



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Karoliina Pesola

Lyöntipaalutuksen loppulyöntikriteerien optimointi iskuaaltomittauksella

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 24.5.2018

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaaja: DI Pekka Ruuti, DI Jarmo Paunonen

Tekijä Karoliina Pesola		
Työn nimi Lyöntipaalutuksen loppulyöntikriteerien optimointi iskuaaltomittauksella		
Koulutusohjelma Master's Programme in Geoengineering		
Pää-/sivuvaine Georakentaminen	Koodi ENG23	
Työn valvoja Professori Leena Korkiala-Tanttu		
Työn ohjaaja(t) DI Pekka Ruuti, DI Jarmo Paunonen		
Päivämäärä 24.5.2018	Sivumäärä 91+34	Kieli Suomi

Tiivistelmä

Paalun dynaamista koekuormitusta tai iskuaaltomittauksia käytetään pääsääntöisesti paalun geoteknisen kantavuuden määrittämiseen. Iskuaaltomittauksella, tai ”PDA-mittauksella”, voidaan myös tarkistaa paalujen loppulyöntikriteerit kyseiselle työmaalle, mitata lyöntivasaran toimintakykyä sekä tarkistaa paalun ehjyys. Paalutusohjeissa loppulyöntikriteerit ovat monessa tapauksessa hyvin varman päälle lasketut. PDA-mittauksen avulla voidaan saada selville juuri tiettyyn kohteeseen soveltuvat loppulyöntikriteerit ja ne ovat usein kevyemmät kuin paalutusohjeen loppulyöntikriteerit. Tässä työssä halutaan selvittää, kuinka suuressa mittakaavassa PDA-mittauksia voitaisiin hyödyntää loppulyöntikriteerien optimoinnissa ja minkälaisia hyötyjä voisi saada rakennushankkeeseen. Työ on rajoitettu ainoastaan teräsbetonisiin tukipaaluihin.

YIT Rakennus Oy:llä on käytössään etämittauslaitteisto, jolla voidaan suorittaa PDA-mittauksia ilman, että mittauksen tekijän on oltava paikan päällä. Työssä halutaan selvittää, voidaanko loppulyöntien optimoinnin avulla saada huomattavaa ajallista hyötyä lyöntipaalutustyössä. Mikäli paaluja lyödään vähemmän tiukkaan, lyöntityö lyhenee ja mahdollisesti myös paalupituutta voidaan lyhentää. Kysymyksen voi myös muotoilla, että kannattaako urakoitsijan oman hyödyn takia tehdä PDA-mittauksia työmailla, joissa sitä ei vaadita.

Tutkimusmenetelmänä käytetään tapaustutkimuksia. Työssä käydään läpi neljä erilaista työmaata, joissa loppulyöntikriteerit on määriteltä uudestaan PDA-mittauksen avulla. Veturitien työmaa on esimerkki tavanomaisesta työmaasta, jossa pystytään keventämään loppulyöntiehtoja hieman. K3 Wihuri on työmaa, jossa saatiin hyvin selkeitä etuja loppulyöntiehtojen keventyessä huomattavasti, paalut lyhenivät ja vähenivät määrältään ja kalliokärjet vaihdettiin edullisempiin maakärkiin. Hyvinkään Astreankadulla saatiin yli kaksinkertaiset vaaditut kantavuudet, mutta suunnittelija päätti, että paalut lyödään syvemmälle. Espoon Piruetissa paalut lyötiin ohjeiden mukaiseen tiukkuuteen, mutta kantavuuksia ei siltikään saavutettu. Lopuksi pohditaan, minkälaisilla työmailla menetelmästä voisi olla eniten hyötyä.

Tapaustutkimusten, haastatteluiden ja urakoitsijan kokemuksen perusteella voidaan todeta, että suurimmat hyödyt saavutetaan, kun maaperä sisältää paksuja kitkamaakerroksia. Ylipäänsä voidaan suositella, että suurilla työmailla varmistetaan loppulyöntikriteerit PDA-mittauksen avulla. Etämittauslaitteisto tekee mittauksesta huomattavasti nopeampaa ja joustavampaa verrattuna perinteiseen mittaukseen, joten urakoitsijan kannattaa hyödyntää laitteistoa niin paljon kuin mahdollista. Mikäli PDA-mittauksia pystyttäisiin entistä enemmän käyttämään jo ennen varsinaista paalutustyötä suoritettavassa koepaalutuksessa, voitaisiin jopa suunnitteluvaiheeseen vaikuttaa, mikäli saadut tulokset ovat hyvät. Tällöin paaluja voidaan lyhentää ja mahdollisesti jopa vähentää.

Avainsanat lyöntipaalutus, tukipaalu, teräsbetonipaalu, kantavuus, loppulyöntikriteerit, dynaaminen koekuormitus, iskuaaltomittaus, PDA-mittaus

Author Karoliina Pesola		
Title of thesis Optimization of end-of-driving requirements in pile driving by high strain dynamic load testing		
Degree programme Master's Programme in Geoengineering		
Major/minor Geoengineering		Code ENG23
Thesis supervisor Professor Leena Korkiala-Tanttu		
Thesis advisor(s) MSc Pekka Ruuti, MSc Jarmo Paunonen		
Date 24.5.2018	Number of pages 91+34	Language Finnish

Abstract

A dynamic loading test is used primarily for determining the bearing capacity of a pile. It is also possible to determine the end-of-driving requirements for a specific site, measure the functionality of pile hammer and check the integrity of the pile by using PDA-measurements. The end-of-driving requirements in regulations are in many cases cautious, but by using PDA-measurements it is possible to determine the fitting end-of-driving requirements for a construction site. The end-of-driving requirements are often lighter compared to the end-of-driving requirements in regulations. The aim of this thesis is to identify in how large a scale PDA-measurements could be used for optimizing of end-of-driving requirements and what kind of benefits are possible in a construction project. In this thesis, only end-bearing reinforced concrete piles are considered.

YIT Rakennus Oy is using a remote operated PDA-computer, which means that measurements can be done without the measuring part present at the site. The goal of this thesis is to resolve whether by optimizing the end-of-driving requirements it is possible to gain a noticeable benefit in reduced piling duration. If the piles are installed with lighter end-of-driving requirements, the installation time needed is shorter and it might be possible to use shorter piles. The question can also be stated whether the contractor gains from making PDA-measurements even though the construction design does not require them.

Case-studies are used as research methods in this thesis. Four different sites, in which end-of-driving requirements have been optimized, are presented. Veturitie construction site represents a conventional piling site, where little lighter end-of-driving requirements can be used. At K3 Wihuri construction site important benefits were gained when the end-of-driving requirements were significantly lighter. Shorter piles could be used, some piles were completely left out and rock shoes were replaced with pile shoes. Hyvinkää Astreankatu construction site is an example of a site, where gained bearing capacity of piles were twice as large as required, but the designer decided that the piles should be installed deeper down in the ground. At Espoon Piruetti construction site piles were installed according to the regulations, but even then, they did not reach the needed bearing capacity. In the end it is discussed which kinds of construction sites can benefit from PDA-measurements.

Based on case-studies, interviews and experience of contractors it can be noticed that major benefits are gained when the soil consists of thick layers of friction soils. Overall it can be recommended, that end-of-driving requirements should be checked with PDA-measurements at large construction sites. A remote operated measurement device makes the measurements much faster and flexible compared to conventional measurements, so the contractor should utilize the device as much as possible. If PDA-measurements could be used even more on test piling before the actual piling work, even the design phase could utilize the results. In that case piles could be designed shorter and maybe even decreased in amount.

Keywords pile driving, end-bearing pile, reinforced concrete pile, bearing capacity, end-of-driving requirements, dynamic loading test, PDA-measurements

Alkusanat

YIT Rakennus Oy antoi diplomityön aiheeksi selvittää, mitä hyötyjä PDA-mittauksen avulla voitaisiin saavuttaa, kun sitä käytetään loppulyöntikriteerien optimointiin. Haluan kiittää mahdollisuudesta työskennellä kiinnostavien työtehtävien parissa sekä mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta YIT Rakennus Oy:n Pekka Ruutia, joka on toiminut myös työn ohjaajana. Kiitos myös Jarmo Paunoselle, joka toimi työn toisena ohjaajana, ja eteenkin työn alkuvaiheessa auttoi työn suunnittelussa. Kiitos työni valvojalle, georakentamisen professori Leena Korkiala-Tantulle, rakentavista kommentista ja hyvistä vinkeistä diplomityön tekoon.

Kiitos Kiwa Inspectan teknisille asiantuntijoille Teemu Repolle ja Teemu Riihimäelle, jotka osallistuivat haastatteluun PDA-mittauksen erikoistuntijoina. Kiitos YIT Infra Oy:n tekniselle johtajalle Tommi Hakaselle, jota haastattelin PDA-mittauksesta urakoitsijan näkökulmasta. Kiitos myös YIT Rakennus Oy:n paalutustyönjohtajille, jotka ovat auttaneet minut vuoden aikana lyöntipaalutuksen ja PDA-mittauksen saloihin.

Viimeisenä muttei vähäisempänä suurkiitos perheelleni, avopuolisolleni ja ystävilleni kannustuksesta koko opiskeluajan läpi. Ei ollut helppo matka, mutta se ei tainnut olla tarkoituskaan.

Espoo 24.5.2018



Karoliina Pesola

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
Merkinnät	7
Lyhenteet.....	9
1 Johdanto	10
2 Lyöntipaalutuksen toteutus ja suunnittelu.....	12
2.1 Paalut rakenteiden perustuksena	12
2.1.1 Lyöntipaalutus menetelmänä	12
2.1.2 Luokitukset.....	13
2.1.3 Tukipaalut, kitkapaalut.....	14
2.1.4 Teräsbetonipaalut	15
2.2 Paalujen rakenteellinen mitoitus	19
2.2.1 Paalun eri mitoitustavat.....	19
2.2.2 Paalutuskava	19
2.2.3 Paaluun vaikuttavat rasitukset.....	20
2.3 Paalun geotekninen mitoitus	21
2.3.1 Eri mitoitustavat	21
2.3.2 Mallipaalumenetelmä.....	22
2.3.3 Mitoitus dynaamisten koekuormitusten perusteella.....	23
2.3.4 Iskuaaltoteoria	25
3 Paalujen koekuormitus	29
3.1 Koekuormitukset yleisesti	29
3.2 PDA-mittauksen käyttö	30
3.3 PDA-laitteisto	33
3.4 CASE-menetelmä.....	34
3.4.1 Paalun kantavuuden laskenta	34
3.4.2 RMX-estimaatti.....	36
3.4.3 Vaimennuskertoimen valinta	36
3.4.4 CAPWAP-analyysi	37
3.5 Kuvaajien tulkinta	38
4 Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät	48
4.1 Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät.....	48
4.2 PDA-mittauksen suoritus	48
4.3 Tapaustutkimuksissa käytetty lyöntikalusto.....	58
4.4 Rakennuskohteiden esittely	59
5 Tapaustutkimukset	61
5.1 Veturitie, Helsinki	61
5.1.1 Työmaan kuvaus	61
5.1.2 Pohjaolosuhteet	61
5.1.3 Paalutus	62
5.1.4 PDA-mittaustulokset.....	64
5.1.5 Pohdinta	65
5.2 K3 Wihuri, Vantaa	65
5.2.1 Työmaan kuvaus	65
5.2.2 Pohjaolosuhteet	65

5.2.3	Paalutus	66
5.2.4	PDA-mittaustulokset	68
5.2.5	Perustamistavan muutokset	70
5.2.6	Pohdinta	70
5.3	Hyvinkään Astreankatu	71
5.3.1	Työmaan kuvaus	71
5.3.2	Pohjaolosuhteet	71
5.3.3	Paalutus	72
5.3.4	PDA-mittaustulokset	73
5.3.5	Perustamistavan muutokset	74
5.3.6	Pohdinta	75
5.4	Espoon Piruetti	75
5.4.1	Työmaan kuvaus	75
5.4.2	Pohjaolosuhteet	75
5.4.3	Paalutus	76
5.4.4	PDA-mittaustulokset	77
5.4.5	Pohdinta	80
6	Tulosten analysointi ja vertailu	81
6.1	Tapaustutkimusten vertailu	81
6.2	PDA-mittauksen suorituksen optimointi	82
6.3	Lyöntityössä säästettävä aika	83
6.4	Suurimmat hyödyt työmaalle	84
7	Johtopäätökset	86
7.1	Yhteenveto ja päätelmät	86
7.2	Ehdotuksia jatkotutkimuksille	87
	Lähdeluettelo	88
	Liiteluettelo	91
	Liitteet	

Merkinnät

A_b	[mm ²]	Paalun pohjan pinta-ala
$A_{s;i}$	[m ² /m]	Paalun vaipan pinta-ala maakerroksessa
AR	[cm ²]	Paalun poikkipinta-ala
C	[mm]	Yläpään jousto lyönnin aikana
CSB	[MPa]	Laskennallinen jännitys paalun kärjessä
CSI	[MPa]	Suurin hetkellinen puristusjännitys yksittäisen anturin kohdalla
CSX	[MPa]	Maksimi puristusjännitys koko poikkileikkauksessa (FMX/AR)
DMX	[mm]	Suurin siirtymä antureiden kohdalla
EB	[kN]	Paalun kärkivastus
EM	[MPa]	Paalun kimmomoduuli
EMX	[kNm]	Paaluun siirtynyt energia
FMX	[kN]	Maksimivoima paalussa
F_{neg}	[kN]	negatiivinen vaippahankaus
FVP	-	Mitatun voiman ja nopeuden yhtämittaisuus
H	m	Järkäleen pudotuskorkeus
J_c	-	CASE-vaimennuskerroin
$K_{stan\varphi_a}$	-	Maan sisäisestä leikkauskestävyyskulmasta riippuva vaippa-kestävyyskerroin
LE	[m]	Antureiden etäisyys paalun kärjestä
LP	[m]	Paalun maassa oleva pituus
M	[kg]	Paalunvarren massa
N_q	-	Paalun kärjen maan sisäisestä leikkauskestävyyskulmasta riippuva kantavuuskerroin
P_m	[kN]	Maapohjan murtovoima
Q_H	[kN]	Järkäleen paino
$R_{b;cal}$	[kN]	Kärkikestävyys laskettuna pohjatutkimustuloksista
$R_{b;d}$	[kN]	Kärkikestävyysmitoitussarvo
$R_{b;k}$	[kN]	Kärkikestävyysominaisarvo
$R_{c;d}$	[kN]	Puristuskestävyysmitoitussarvo
$(R_{c;m})_{mean}$	[kN]	Mittauksissa mobilisoituneiden staattisten vastusten keskiarvo
$(R_{c;m})_{min}$	[kN]	Pienin mittauksissa mobilisoitunut staattinen vastus
R_d	[kN]	Dynaaminen vastus
$R_{d;max}$	[kN]	Puristuskestävyys murtorajatilassa
RMX	[kN]	Mobilisoitunut staattinen vastus RMX estimaattia käyttäen
R_s	[kN]	Staattinen vastus
$R_{s;cal}$	[kN]	Vaippakitka laskettuna maaparametrien koetuloksista
$R_{s;d}$	[kN]	Vaippakestävyysmitoitussarvo
$R_{s;k}$	[kN]	Vaippakestävyysominaisarvo
R_T	[kN]	Kokonaislyöntivastus
RU	[kN]	Paalun kokonaisuusvastus
SF	[kN/m]	Paalun vaippavastus
SP	[kN/m ³]	Paalun tilavuuspaino
TSX	[kN]	Maksimi vetojännitys paalussa
VMX	[m/s]	Maksimi nopeus antureiden kohdalla
WS	[m/s]	Aallonnopeus paalussa
Z_p	[kN/m ³]	Paalun impedanssi

b	[mm]	Paalun sivun mitta
e	[m]	Paalun pysyvä painuma
$f_{ck,cube}$	[MPa]	Betonin puristuskestävyys
k_1	-	Jätkäleestä riippuva kerroin
k_2	-	Iskutyynystä riippuva kerroin
k_3	-	Maaperästä riippuva kerroin
$q_{b;k}$	[kN/m ²]	Kärkikestävyyden ominaisarvo eri maakerroksissa
$q_{s;i;k}$	[kN/m ²]	Vaippakitkan ominaisarvo eri maakerroksissa
s	[mm]	Paalun pysyvä painuma
$s/10$	[mm]	Pysyvä painuma 10 lyönnillä upotuksen loppuvaiheessa
v_p	[m/s]	Paalun kärjen partikkelinopeus
γ_b	-	Paalun kärkikestävyyden osavarmuusluku
γ_s	-	Paalun vaippakestävyyden osavarmuusluku
ξ_3	-	Korrelaatiokerroin, tutkimusprofiilien lukumäärästä riippuva
ξ_4	-	Korrelaatiokerroin, tutkimusprofiilien lukumäärästä riippuva
ξ_5	-	Korrelaatiokerroin, koekuormitettujen paalujen lukumäärästä riippuva
ξ_6	-	Korrelaatiokerroin, koekuormitettujen paalujen lukumäärästä riippuva
$\sigma'_{v;b}$	[MN/m ²]	Tehokas pystysuora jännitys paalun kärjen tasolla
$\sigma'_{v;i}$	[MN/m ²]	Tehokas pystysuora jännitys paalun vaipalla maakerroksessa i

Lyhenteet

CAPWAP	CAsE Pile Wave Analysis Program, signaalinmallinnus-ohjelmisto
CC1	seuraamusluokka 1
CC2	seuraamusluokka 2
CC3	seuraamusluokka 3
CPT/CPTU	puristinkairaus
DP	heijarikairaus
FVP	force-velocity proportionality, voiman ja nopeuden yhdenmittaisuus
GL1	geotekninen luokka 1
GL2	geotekninen luokka 2
GL3	geotekninen luokka 3
LPO-2005	lyöntipaalutusohje 2005
MWD	porakonekairaus
PDA	Pile Driving Analyzer. Mittauslaitteisto dynaamisen koe-kuormituksen suorittamiseen.
PO-2011	paalutusohje 2011
PO-2016	paalutusohje 2016
PTL1	paalutustyöluokka 1
PTL2	paalutustyöluokka 2
PTL3	paalutustyöluokka 3
RIL	Rakennusinsinööriliitto
RMX	Maximum Case Method, CASE-menetelmän mukainen estimaatti paalun geoteknisestä kantavuudesta
WST	painokairaus
kk	kalliokärki

1 Johdanto

Paalutusperustuksia käytetään, kun maanvarainen perustus ei ole mahdollinen, esimerkiksi painumien, siirtymien, kiertymien, läheisten rakenteiden sijainnin tai perustustavan takia. Teräsbetonipaalut ovat yleisiä rakentamisessa, ja paalujen käyttö lisääntyy kaupunkien ja taajamien kasvaessa. Nykyään joudutaan rakentamaan heikkopohjaisille alueille, joita ennen on vältelty, mutta nyt ovat arvokkaita sijaintinsa takia.

Paalutustyölle on olemassa useampia eri seurantamittauksia, kuten huokospainemittaus, sivusiirtymämittaus, yläpään siirtymämittaus, ehjyysmittaus ja kantavuusmittaus. Tämä diplomityö käsittelee paalujen iskuaaltomittauksia, PDA-mittauksia, jonka avulla voidaan muun muassa määrittää paalujen kantavuus sekä ehjyys. Iskuaaltomittauksia käytetään työmailla jo suhteellisen paljon, useimmiten tärkeimpänä tarkoituksena mitata paalujen puristuskestävyys, paalujen kantavuus. Kohteissa määritellään myös mahdollisesti kyseisen kohteen loppulyöntikriteerit uudestaan, riippuen saaduista tuloksista. Paalutusohjeissa annetut loppulyöntiehtodot ovat varman päälle lasketut. Joskus loppulyöntikriteerit joudutaan tiukentamaan PDA-mittauksen perusteella, mutta monessa kohteessa ne kevenevät.

YIT Rakennus Oy:llä on käytössä ns. etä-PDA-mittauslaitteisto, sillä voidaan tehdä iskuaaltomittauksia yhteydessä mittajaan kanssa ilman, että mittajaan tarvitsee tulla työmaalle. Urakoitsija hoitaa itse mittauksen käytännön järjestelyt työmaalla, ja mittaja käyttää etäluettavaa tietokonetta ja neuvoo mittauksuorituksessa. Urakoitsijan kiinnostuksen kohteena on, että kannattaako etäluettavaa laitteistoa käyttää myös oman hyödyn vuoksi, ilman että suunnitelmat vaativat sitä. Mahdollisuutena olisi paalun lyhyempi asennusaika sekä jopa mahdollisesti lyhyemmän paalun käyttö. Tässä työssä oli tarkoituksena selvittää, että onko mittauksista niin paljon hyötyä, että niitä kannattaa tehdä, vaikkeivat suunnitelmat sitä vaatisi. Jatkokysymyksenä tälle, mikäli vastaus edelliseen on kyllä, on että minkälaisissa maaperissä hyödyt saavutettaisiin. Toinen selvitettävä asia on, että paljonko ajallista hyötyä paalujen kevennetty loppulyöntiehtodot voisivat tuoda.

Teoriaosuudessa käydään läpi perusteet teräsbetonipaaluista ja niiden suunnittelusta, sekä iskuaaltoteoriasta ja iskuaaltomittauksesta. Työ on rajattu teräsbetonipaaluihin, sillä teräsputkipaalut käyttäytyvät vaipallaan eri tavalla. Tässä työssä ei myöskään käsitellä kitkapaaluja, on kuitenkin hyvä mainita, että iskuaaltomittauksia tehdään usein kitkapaalujen asennuksen yhteydessä. Teoriaosuudessa käydään lyhyesti läpi paalun rakenteellinen mitoitus ja geotekninen mitoitus. Kun käydään läpi paalujen mitoitus, myös staattinen koekuormitus mainitaan, mutta sitä ei käsitellä tässä sen enempää tämän työn painottuessa dynaamiseen koekuormitukseen.

Tässä työssä käydään läpi neljä tapaustutkimusta, neljä eri työmaata, jossa PDA-mittaus on ollut merkittävässä osassa loppulyöntikriteerien uudelleen määrittelyssä ja jopa perustamistavan valinnassa. Tässä työssä käsiteltävät työmaat ovat Veturitie Helsingissä, K3 Wihuri Vantaalla, Astreankatu Hyvinkäällä sekä Piruetti Espoossa. Veturitie on valittu mukaan esittelemään tavallisinta tapausta, eli tapaus, jossa loppulyöntiehtodot kevenyvät hieman, noin muutamalla millimetrillä kymmenelle iskulle. K3 Wihuri on esimerkki kohteesta, jossa loppulyöntiehtoja on kevennetty huomattavasti ja näin saatu suurta hyötyä työmaille. Hyvinkään Astreankadulla saadut PDA-mittauksen tulokset olivat erittäin hyvät, kantavuutta paaluille tuli yli kaksinkertainen määrä, mutta suunnittelija päätti, että

paalut lyödään syvempään. Piruetissa loppulyöntikriteerit tiukentuivat taulukkoarvoista, sillä kantavuutta ei saavutettu, ja jouduttiin lyömään pitempää paalua kuin mitä pohjatutkimukset antoivat ymmärtää.

Työn johtopäätöksissä pohditaan iskuaaltomittauksen hyötyjen laajuutta, kannattaako mittauksia suorittaa, vaiikkei sitä vaadittaisi suunnitelmissa. Mietitään hyötyjä sekä ajallisen että rahallisen hyödyn ja laadunvarmistuksen kannalta. Yksi sivutettava seikka on kuinka laajassa skaalassa loppulyöntien uudelleenmäärittäminen voisi nopeuttaa urakoitsijan työsuoritusta. Loppulyöntiehdolla on huomattava vaikutus paalun asennusaikaan, yleensä eteenkin suhteellisen tiukissa maakerroksissa loppulyöntivaihe on huomattavasti pitempi kuin muu paalun asennus, kun paalun painuma hidastuu huomattavasti, muttei vielä loppulyöntikriteerien mukaiseksi. Työtä varten on myös haastateltu PDA-mittauksen ammattilaisia, sekä urakoitsija- että mittauspuolelta. Haastatteluissa esiin tulleita asioita esitetään sekä teoriaosuudessa että pohdinnoissa. Lopussa annetaan myös ehdotuksia tulevaisuuden tutkimukselle ja kehitykselle.

2 Lyöntipaalutuksen toteutus ja suunnittelu

2.1 Paalut rakenteiden perustuksena

2.1.1 Lyöntipaalutus menetelmänä

Paaluja on käytetty kantavina rakenteina perustusten alla jo siitä asti, kun ensimmäiset sillat rakennettiin. Ensimmäinen historiallinen lähde on 400-luvulta eea. Sveitsistä, Italiasta, Skotlannista ja Irlannista on löydetty järvien rannoilta todisteita suuristakin paaluperusteista jopa 4000 vuoden takaa. Esimerkiksi Lough Drumkeeryssä, Irlannissa, arvelaan, että olisi ollut n. 30 000 paalua sekä alkeellisia ponttiseiniä, kun taas Robenhauseenissa, Sveitsissä, oli arviolta yli 100 000 paalua käytössä. Amsterdam, joka perustettiin noin 1000 vuotta sitten, on rakennettu kokonaisuudessaan 15-20 metristen paalujen varaan. (Fleming & Weltman & Randolph & Elson. 1985.)

Viimeisien vuosikymmenten aikana kehitys koneissa ja asennusmenetelmissä on edistynyt melkoisesti, ja rakennetaan enemmän ja enemmän alueille, joissa vallitsee huonot pohjaolosuhteet. Nämä seikat ovat johtaneet huomattavaan kehitykseen alalla. (Tomlinson & Woodward. 2014.) Teräsbetonipaaluja asennetaan Suomessa n. 1500 kilometria vuodessa (Jääskeläinen. 2009.)

Paaluja siirtävät kuormia kantavaan kerrokseen, kuten moreeniin tai kallioon. Paalutus on teknisesti soveltuva ratkaisu, kun paalut saadaan asennettua tavoitetasoon luotettavasti ja geotekninen kestävyys voidaan varmistaa, eikä paalun kärki liu'u kallionpinnalla. Paalun tulee olla ehjä siirtääkseen kuormaa. Ympäristövaikutukset on myös otettava huomioon, esimerkkinä tästä tärinä, maan syrjäytyminen ja siirtymät, maanpinnan nousu, huokosvesipaineen nousu sekä maakerrosten tiivistyminen. (Liikennevirasto. 2014.)

Paalut voidaan jakaa maata syrjäyttäviin ja maata syrjäyttämättömiin paaluihin. Maata syrjäyttävät paalut voidaan asentaa lyömällä, täräyttämällä, ruuvaamalla tai yhdistelemällä edellä mainittuja tapoja. Maata syrjäyttämättömiä paaluja, kuten kaivinpaaluja ja porapaaluja ei käsitellä. Tässä työssä käsitellään ainoastaan lyömällä asennettuja paaluja, eli lyöntipaaluja. Kun valitaan paalutyyppejä, paalumateriaalia ja asennusmenetelmää tulee ottaa huomioon muun muassa pohjaolosuhteet ja pohjavesiolosuhteet, eritoten maapohjassa olevat mahdolliset esteet, jotka voivat vaikeuttaa paalutustyötä tai vahingoittaa paaluja. Paaluihin syntyvät jännitykset ja paalun ehjyys on huomioitava, ja paalun ehjyyttä pitää pystyä mitata. Paalutus aiheuttaa tärinää, ja tämän vaikutus jo olemassa oleviin rakenteisiin on huomioitava. (RIL 207-2017.)

Paalutuksessa käytetään niin sanottuja loppulyöntejä paalun oikeanlaiseen asennukseen. Käytännössä ne määrittävät kuinka pieni painuman kymmenellä iskulla on oltava, jotta kantavuus paalussa olisi tarpeeksi suuri. Loppulyöntiehdossa on myös määritelty eri paalutypeille ja eri pituisille paaluille soveltuvat järkäleen pudotuskorkeudet sekä paalujen painumat kymmenellä iskulla. Paalutusohjeessa olevat paalujen loppulyönnit on määritelty niin, että vaikuttava voima paalussa ja maapohjassa on kohtuullisen varmuuskertoimen kanssa tulevaa kuormaa suurempi, mutta silti sellainen, että paalu sen kestää. Paalut eivät kestä suuria työvirheitä, kuten esimerkiksi jatkuvasti liian korkeaa lyöntikorkeutta. Paalutusohjeen tai pohjasuunnittelijan ohjeen mukaan loppulyöntejä lyödään kolmesta viiteen sarjaan, yhden sarjan ollessa kymmenen lyöntiä. Loppulyöntien on tarkoitus tiivistää maa paalun alla sekä toistaa rasitus useita kertoja, jotta saadaan varmuus paalun

pysyvyydestä. Kun lyödään paalua kalliota vastaan, varmistetaan loppulyöntejen avulla kärjen upottaminen paikalleen kallioon (Jääskeläinen. 2009).

2.1.2 Luokitukset

Suunnitteluvaiheessa määritetään ensin Eurokoodin mukainen seuraamusluokka CC sekä geotekninen luokka GL. Kun määritellään geoteknisen kestävyysmitoitussarvo, käytetään NCCI 7 ja Paalutusohjetta. Suunnitteluvaiheessa määritetään myös paalutusluokka, jonka mukaan paalun rakenne määrittyy. Paalutustyyppi on toteutuksen huomioiva luokitus. Se huomioi rakennustoleranssit, kuormituskomponentit, paaluperustuksen toimivuus sekä ylärakenteen kyky jakaa paaluihin kohdistuvia rasituksia omalla jäykkyydellään. (RIL 254-2016.)

Geoteknisiä luokkia on kolme; GL1, GL2 ja GL3. GL1, eli geotekninen luokka 1, on helppo rakennuskohde, GL2 vaativa kohde ja GL3 erittäin vaativa kohde. Taulukosta 2.1 nähdään suositeltavat kairausmenetelmät eri geoteknisille luokille.

Taulukko 2.1 Suositeltavat kairausmenetelmät eri geoteknisissä luokissa lyöntipaaluille. Selitykset lyhenteille alla. (RIL 254-2016.)

	GL1	GL2	GL3
Lyöntipaalut			
Tukipaalut	DP, WST	DP, WST, MWD	DP, WST; MWD
Kitkapaalut	DP, WST	DP, WST, CPT/CPTU	DP, WST, CPT/CPTU

WST = painokairaus

DP = heijarikairaus

MWD = porakonekairaus

CPT/CPTU = puristinkairaus

Ominaista helpoille rakennuskohdille on, että riskit ovat olemattoman pieniä kokonaisvakuuden tai maapohjan liikkeiden suhteen, tai pohjaolosuhteista ovat yksinkertaisia ja niistä on vertailukelpoisia tuloksia vastaavista kohteista. Helpoissa rakennuskohteissa voidaan käyttää rutiinimenetelmiä perustusten suunnittelussa ja rakentamisessa. Kairauksista käytetään ainakin paino- tai porakonekairausta, suositeltavaa olisi käyttää heijarikairausta. (RIL 254-2016.)

Vaativissa kohteissa, GL2, on tehtävä riittävän laajat pohjatutkimukset, että suunnittelu ja rakentaminen voidaan tehdä luotettavasti. Pohjatutkimusten tulee kattaa koko paalutuksen vaikutusalue, sekä ulottua niin syvälle, että tiedetään kaikki kerrostumat, jotka voivat vaikuttaa rakentamiseen. Kairatessa on valittava kairausmenetelmä niin, että päästään paalun oletetulle tukeutumistasolle. Voidaan hyödyntää painokairauksen ohella esimerkiksi heijari-, puristin-, puristinheijari- ja porakonekairausta. (RIL 254-2016.)

Erittäin vaativissa kohteissa, GL3, käytetään vähintään samoja vaatimuksia kuin vaativissa kohteissa. Tämä ei välttämättä ole riittävää, ja tällöin pohjatutkimuksia tehdään tiheämpään kuin vaativissa kohteissa ja otetaan tarvittaessa maanäytteitä. Lyöntipaalutuksen suunnittelu vaatii erityistä tarkkuutta, kun on vaara, että paalut luisuvat sivusuunnassa

kallionpinnalla. Näin voi käydä esimerkiksi, jos kallion päällä on ainoastaan hienorakenteisia kerroksia, maakerrokset kallion päällä ovat löyhiä tai mikäli tiivis kerros kallion päällä on hyvin ohut. (RIL 254-2016.)

Seuraamusluokkia on kolme; CC1 tarkoittaa vähäisiä seuraamuksia, CC2 keskisuuria seuraamuksia ja CC3 suuria seuraamuksia. Seuraamukset lasketaan ihmishenkien menetyksissä tai taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen laajuudessa. Seuraamusluokka CC3 valitaan, kun rakennuksessa on usein paljon ihmisiä, kuten yli 8-kerroksinen asuin, konttori- tai liikerakennus, konserttisali, teatteri, urheilu- tai näyttelyhalli tai katsomo. Ominaista on raskaasti kuormitetut ja suuria jännevälejä sisältävät rakennukset, erikoisrakenteet kuten tornit, sekä luiskat, penkereet ja muut rakenteet, jotka sijaitsevat esimerkiksi hienorakeisten maalajien alueella. Seuraamusluokka CC1 on esimerkiksi 1-2 kerroksissa rakenteissa, joissa oleskelee ihmisiä vain väliaikaisesti. Seuraamusluokka CC2 tarkoittaa rakennuksia ja rakenteita, jotka eivät kuulu ryhmään CC3 tai CC1. (RIL 207-2017).

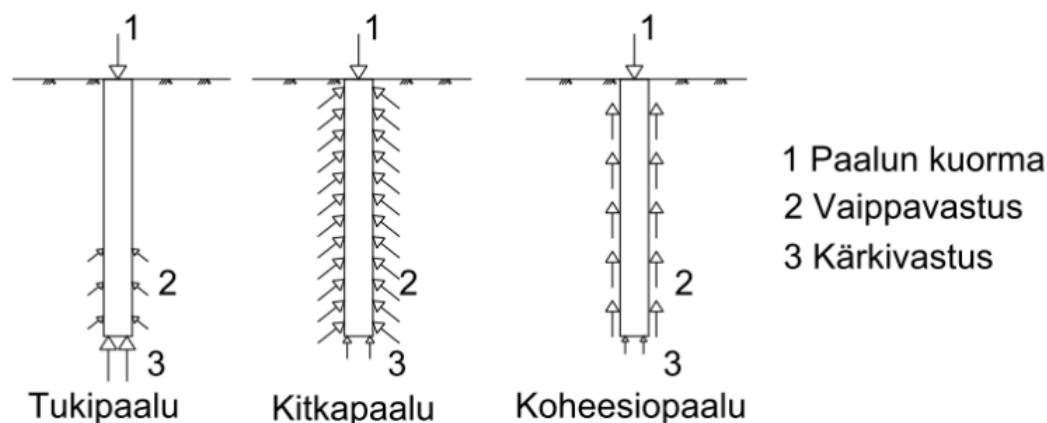
Paalutusohje 2016 mukaisesti paalutusluokka määräytyy kohteen seuraamusluokan ja geoteknisen luokan perusteella, kuten taulukossa 2.2 on esitetty. Paalutustyöluokkia on sekä paalutusohje 2011 että 2016 mukaisesti kolme, Paalutusluokka 1 eli PTL1, Paalutusluokka 2 eli PTL2 ja Paalutusluokka 3 eli PTL3. Paalutustyöluokka kertoo paalutustyön toteutuksesta, ja PTL3 on käytössä vaativimmissa tapauksissa. Paalutusluokassa 3 on aina tehtävä PDA-mittauksia kantavuuden varmistamiseksi.

Taulukko 2.2 Mahdolliset paalutustyöluokat geoteknisen luokan ja seuraamusluokan perusteella. (RIL 254-2016.)

Geotekninen luokka	Seuraamusluokka		
	CC1	CC2	CC3
GL1	PTL1...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL2...(PTL3)
GL2	PTL1...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL3
GL3	PTL2...(PTL3)	PTL2...(PTL3)	PTL3

2.1.3 Tukipaalut, kitkapaalut

Paalut voidaan jakaa tukipaaluihin, kitkapaaluihin sekä koheesiopaaluihin. Tukipaalut siirtävät kuorman pääosin kärjen välityksellä kallioon tai tiiviiseen maakerrokseen. Kitkapaalu taas siirtää suurimman osan kuormasta paalun vaippapinnan kautta kitkan välityksellä maaperään. Koheesiopaalu siirtää kuorman vaippapinnan adheesion kautta koheesiomaakerrokseen. Koheesiopaaluja voi käyttää ainoastaan rakenteissa, jossa suurehkojakin painumia voidaan sietää. (Jääskeläinen. 2009.) Kuvassa 2.1 on esitelty tukipaalun, kitkapaalun ja koheesiopaalun vaippavastuksen ja kärkivastuksen osuudet kantavuudesta.



Kuva 2.1 Tukipaalun, kitkapaalun ja koheesiopaalun toiminta. (Kuva: Rasi-Koskinen, 2014.)

2.1.4 Teräsbetonipaalut

Lyöntipaalutukseen käytetyt paalut ovat tehdasvalmisteisia teräsbetonipaaluja. Tavallisin käytetty poikkileikkauksen teräsbetonipaaluille on 250 mm, 300 mm sekä 350 mm. Suurimmat olemassa olevat tehdasvalmisteiset teräsbetonipaalut ovat 600 mm poikkileikkaukseltaan, mutta niitä ei valmisteta Suomessa. Ennen tavallisimmat paalut olivat poikkileikkaukseltaan 250 mm, mutta nykyään suuremmat paalut ovat yleistyneet. Tavallisin paalutyyppi on 300 mm teräsbetonipaalu, noin 70 % osuus, ja myös 350 mm teräsbetonipaalut yleistyvät vauhdilla. (Jääskeläinen. 2009.) Taulukossa 2.3 on esitetty erikoisten paalujen sivun mitta b , paalun massa M , paalun poikkileikkauksen ala A_b , paalun vaipan pinta-ala $A_{s,i}$ sekä betonin puristuskestävyys. Taulukossa 2.4 on esitetty paalujen puristuskestävyydet murtorajatilassa paalutustuotelehden 2011 mukaisesti. Diplomityön kirjoittamishetkellä paalutusohje 2016 on julkaistu, mutta ei päivitettyä paalutustuotelehteä, joten 2011 versio on uusin saatavilla oleva.

Taulukko 2.3 Paalujen perustiedot. (Paalutustuotelehti 2011.)

Paalun tyyppi	b [mm]		C [mm]		M [kg/m]	A_b [mm ²]	$A_{s,i}$ [m ² /m]	$f_{ck,cube}$ [MPa]
TB250a	250	+15 -10	25	10	156	62500	1,00	45
TB250b	250				156	62500	1,0	45
TB300a	300				225	90000	1,20	45
TB300b	300				225	90000	1,20	45
TB300c	300				225	90000	1,20	50
TB350a	350				307	122500	1,40	50

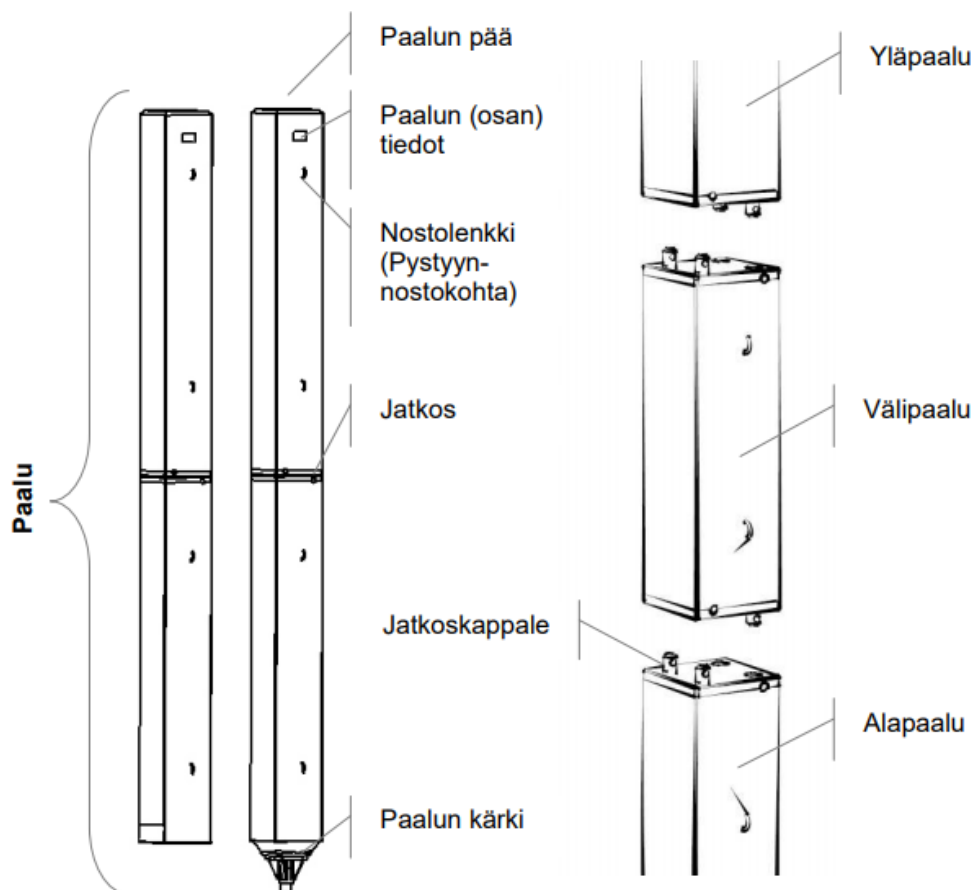
Taulukko 2.4 Paalujen puristuskestävyydet murtorajatilassa. (Paalutustuotelehti 2011)

Paalun tyyppi	R _{d,max} [kN]		
	PTL3	PTL2	PTL1
TB250b	682	614	558
TB300a	870	783	711
TB300b	972	874	795
TB300c	1124	1012	920
TB350a	1509	1358	1234

Paaluja suunnitellessa on otettava huomioon kaikki tilanteet, johon paalu joutuu. Huomioitavia olosuhteita ovat käyttöolosuhteet, esimerkiksi korroosio-olosuhteet, asennusolosuhteet, kuten esimerkiksi lohkat ja jyrkästi kaltevat kalliopinnat, sekä paalujen kuljetus- ja asennusolosuhteet. Paalua suunnitellessa on otettava huomioon rakennustoleranssit, kuormituskomponentit ja paaluperustuksen toimivuus. Mikäli maaperä on erittäin pehmeää, maan ominaisleikkauslujuus alle 10 kPa, tai mikäli paalu on osittain ilmassa, on otettava huomioon paalun nurjahduksen mahdollisuus. (RIL 207-2017).

Paalut mitoitetaan niin, että ne kestävät painumatta, murtumatta, nurjahtamatta ja syöpy-mättä. Tämän lisäksi niiden on kestävä myös siirrot varastoinnissa, kuljetukset, sekä asennuksen aikaiset iskut. Teräsbetonipaalun omapaino on noin 1500-4000 kg, joten jo paalun omapaino aiheuttaa rasituksen paalua käsitellessä. Paaluja voi esijännittää, silloin ne kestävät vetojännityksiä paremmin, joten ne kestävät esimerkiksi käsittelyä työmaalla paremmin. Toisaalta mitä enemmän paalua esijännitetään ja sen taivutuslujuus kasvaa, sen puristuslujuus pienentyy. Esijännitettyjä paaluja on myös hankalampi katkaista. (Fleming. 1985.)

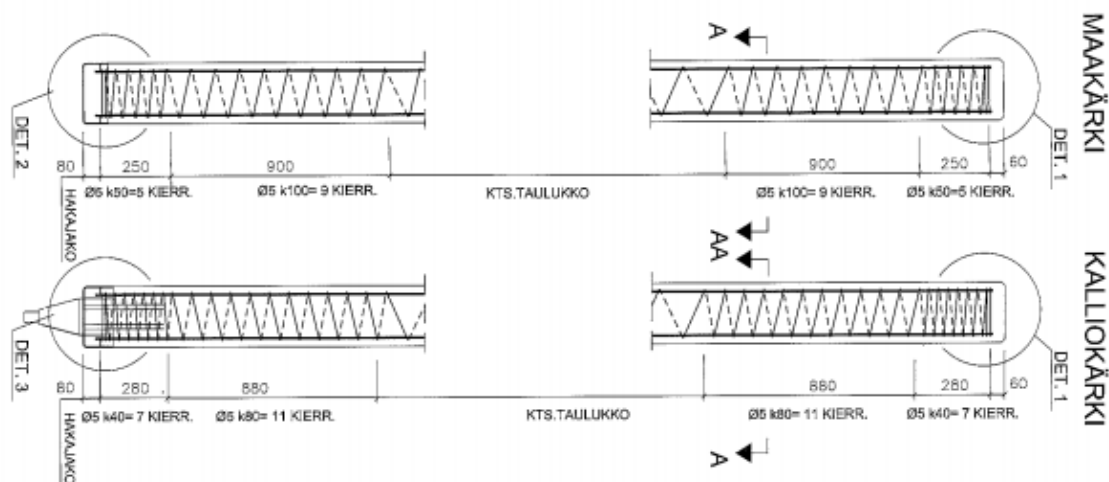
Paalu voi olla yksimittaisena korkeintaan 15 metrinen, mutta jatkoksien avulla voidaan jatkaa paaluja hyvinkin pitkiksi. Paalua, jossa on kärki kiinnitettynä, kutsutaan alapaa-luksi. Paalun yläpää on paalu, johon paalun pää on kiinnitetty. Näiden välissä voi olla ns. välipaaluja, eli paaluja, joissa on jatkos molemmissa päissä. Kaikkiin paaluihin on asen-nettu kaksi nostolenkkiä, ja jokaisessa paalussa tulee myös olla näkyvillä paalun tiedot. Kuvassa 2.2 paalun rakenne esiteltynä.



Kuva 2.2 Teräsbetonipaalun rakenne. (Kuva: Paalutuotelehti 2011).

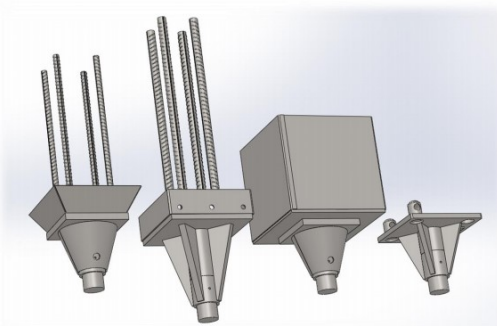
Paaluissa käytettävä betoni valitaan paalutustyöluokan mukaan. Mikäli maaperä on aggressiivinen, eli sisältää esimerkiksi happoja tai sulfaattisuoloja, paalut tulevat kosketukseen happamien jätevesien, suolaisen meriveden tai teollisuusjätteiden kanssa, tai syöpy-misvaara on olemassa, käytetään ylimää räisiä varmuuskertoimia. Paaluille määritetään rasi tusluokka sekä teräksen korroosionopeus. Ympäristöluokat XA1, XA2 sekä XA3 ovat ilmaisevat kemiallisen rasituksen paalulle. Sulfaatin kestävä sementtiä tulee käyttää ympäristö rasi tusluokissa XA2 sekä XA3. On myös selvitettävä tuleeko muiden pohjaraken-teiden olla sulfaatinkestävää. (Liikennevirasto. 2017.)

Teräsbetonipaaluissa on yleensä neljä pääterästankoa. Paaluissa on myös hakateräkset, joiden tiheys vaihtelee paalun sisällä. Hakateräkset ovat tiheimmillään lyöntipäässä sekä kärjessä, sillä näissä kohdissa halkaisuvoimat ovat suurimmat. (Jääskeläinen. 2009.) Ku-vassa 2.3 on esitetty hakaterästen sijainnit paalun sisällä.

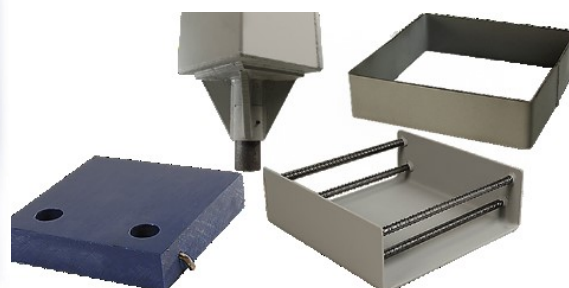


Kuva 2.3 Hakaterästen sijainnit teräsbetonipaalussa. (Kuva: Paalutuotelehti 2005).

Paalut varustetaan joko maakärjillä tai kalliokärjillä. Maakärki suojaa paalun alaosa vaurioitumiselta, ja sitä voidaan käyttää, kun maaperässä ei ole suuria kiviä tai lohkareita, ja kun paalua ei asenneta kallioon saakka (Paalutuotelehti 2011). Kalliokärkiä käytetään estämään sivuliukumisen, ja mikäli pohjatutkimusten mukaan kärki on tunkeutumassa kallionpintaan tai lohkareiseen pohjamaakerrokseen, kalliokärkeä on käytettävä. Kalliokärkeä käytetään myös, mikäli se parantaa paalun tunkeutuvuutta. Uuden lyöntipaalutusohjeen mukaan PO-2016 kaikki paalut tulee jatkossa varustella kalliokärjillä. (Liikennevirasto. 2014). Kuvissa 2.4a ja 2.4b esitelty teräsbetonipaalun kalliokärki, lyöntilevy sekä tukivanne.



Kuva 2.4a Emeca kärjet (Kuva: Emeca. 2018)

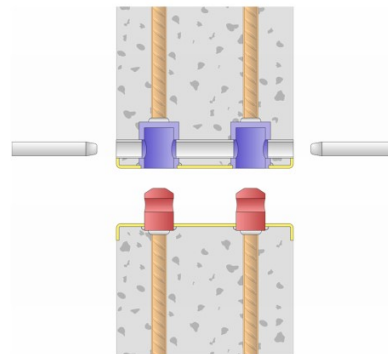


Kuva 2.4b Emeca lyöntilevy ja tukivanne (Kuva: Emeca. 2018)

Paaluja on mahdollista jatkaa kiinteillä paalujatkoksilla. Yksimittaisin paalu on pisimmillään 15 metriä pitkä, mutta paalujatkoksien avulla voidaan jatkaa paalun mittaa haluttuun mittaan. Soveltuvissa pohjaolosuhteissa on asennettu jopa 100-metrisiä jatkettuja paaluja (Fleming, 1985). Paalun jatkoksina käytetään niin sanottuja jäykkäkatkoksia, jotka on suunniteltu niin, etteivät ne heikennä paalua ja täten sallittua kuormaa. Jatkos asennetaan paaluun samaan valumuottiin pääterästen kanssa paalutehtaalla, ja nämä muodostavat näin luotettavan liitoksen. Työmaalla osapaalut liitetään yhteen lyömällä lukitustapit jatkoksen lukkoihin. (Emeca). Kuvissa 2.5a ja 2.5b esitelty paalujatkos sekä jatkoksen lukitus.



Kuva 2.5a Emeca paalujatkos (Kuva: Emeca. 2018.)



Kuva 2.5b Jatkoksen lukitusmekanismi (Kuva: Emeca. 2018.)

2.2 Paalujen rakenteellinen mitoitus

2.2.1 Paalun eri mitoitustavat

Paalujen kantavuuteen vaikuttaa kaksi tekijää, paalun geotekninen kantavuus ja paalun rakenteellinen kantavuus. Käytännössä, vaikka paalu olisi kuinka luja tahansa, se ei kannu, mikäli maaperä antaa periksi. Samalla tavalla, mikäli maaperä olisi kuinka luja tahansa, paalu voi murtua ja täten ei kannu. Paalun geotekninen kantavuus huomioi varmuuden maapohjan murtumista vastaan sekä sallitut painumat, rakenteellinen kantavuus taas paalun rakenteellisen murtumisen sekä paalun sallitut muodonmuutokset. Teräsbetonipaalin kantavuudella tarkoitetaan paalun pituusakselin suuntaista kantavuutta. (RIL 254-2016.)

Mitoittaessa paalua huomioitavia tekijöitä on paalun rakenteellinen kestävyys, poikittaiskuormitetun paalun kestävyys, puristus- sekä vetokestävyys. Materiaalien ja varusteiden laatuvaatimukset tulee myös ottaa huomioon. Ympäristöstä riippuvia tekijöitä ovat esimerkiksi maanpaine, negatiivinen vaippahankaus, sivukuormat, taivutus- ja leikkausrasitukset. Rakenteiden kuormat ja työnaikaiset kuormitukset määräävät pitkälti vaatimukset paalulle. Pohjatutkimusten avulla voidaan määritellä paalun geotekninen puristuskestävyys ja vetokestävyys. Tässä työssä käsitellään ainoastaan puristuskestävyyden mitoittamista, koska se on keskeisin osa koekuormituksia tehdessä, vaikkakin koekuormituksia tehdään myös paaluille, jotka altistuvat vetokuormituksille.

2.2.2 Paalutuskaava

Järkäleen potentiaalienergia muuttuu liike-energiaksi, joka siirtyy paaluun ja aiheuttaa tähän painumaa sekä maapohjan joustoa. Tästä yleisestä paalutuskaavasta nähdään yhteys pudotuskorkeuden, maapohjan murtovoiman sekä painuman ja jouston välillä. Paalutuskaava kuten Jääskeläisen oppikirjassa esitetty:

$$Q_H \times H = P_m \times s + 0,5 \times P_m \times C \quad (1)$$

Q_H = järkäleen paino (kN)

H = järkäleen pudotuskorkeus (m)

P_m = maapohjan murtovoima (kN)

s = paalun pysyvä painuma (m)

C = yläpään jousto lyönnin aikana (m)

Yhtälöstä nähdään, että vasaran toiminnan pysyessä vakiona ja paalun painuman pienen-
tyessä jousto ja murtovoima kasvaa. Mikäli paalua lyödään kalliota vasten koko iskutyö
muodostaa joustoa ja murtovoima on suurimmillaan. Kaavasta saadaan ratkaistua paalun
teoreettinen murtokuorma P_m . Murtokuorman yhtälö (Jääskeläinen. 2009):

$$P_m = k_3 k_2 k_1 Q_H \times H / (s + 0,5 \times C) \quad (2)$$

k_1 = järkäleestä riippuva kerroin. Kertoimet esitelty taulukossa 2.5.

Taulukko 2.5 Järkäleestä riippuvien kertoimien arvot eri järkäleille. (Jääskeläinen. 2009.)

Kerroin	Vaijerijärkäle	Vapaasti putoava hydraulijärkäle	Kiihdytetty hydraulijärkäle
k_1	0,8	0,9	1,0

k_2 = iskutyynystä riippuva kerroin, yleensä 0,85, paitsi jos iskutyynyn toiminta järkä-
leessä on mitattu ja kalibroitu.

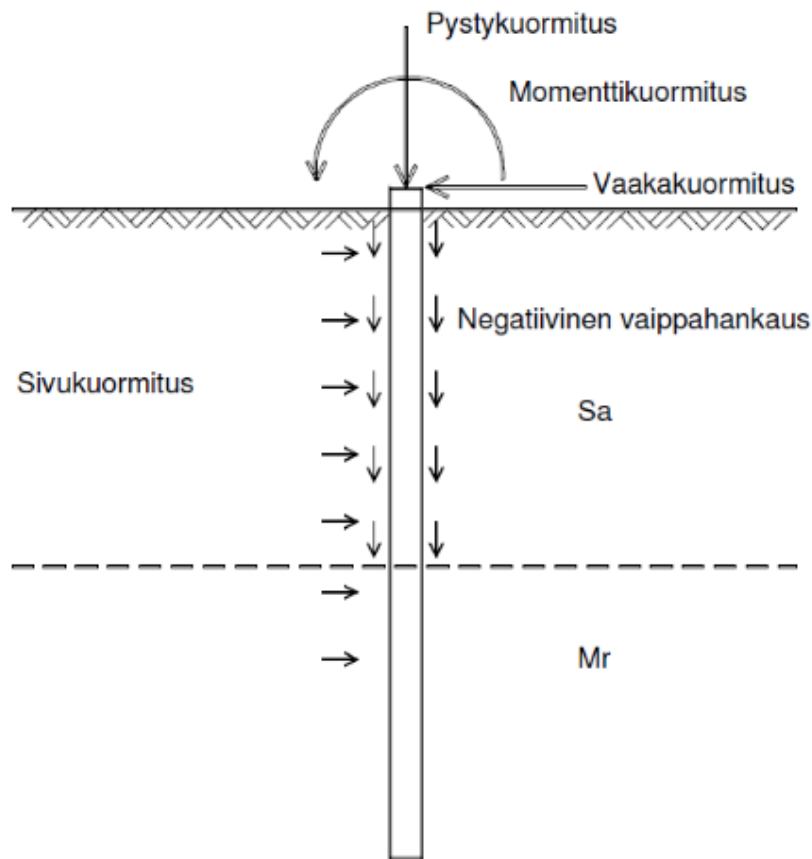
k_3 = maaperästä riippuva kerroin. Mikäli PDA-mittauksia ei tehdä, annetaan moreeniin
tukeutuvalle paalulle arvoksi 0,7-0,85 ja kallioon tunkeutuvalle paalulle arvo 0,85-1,0.

On huomioitava, että paalutuskaava on ideaalinen, ja se toimii parhaiten, kun lyödään
paalu löyhän maakerroksen läpi tiukkaan pohjakerrokseen. Kaava ei täsmää, mikäli paalu
toimii kitkapaaluna. (Jääskeläinen. 2009.)

2.2.3 Paaluun vaikuttavat rasitukset

Paalun tulee kestää pysty-, vaaka-, sivu- ja momenttikuormituksia sekä negatiivista vaip-
pahankausta. Paalu tulee mitoittaa niin, että se kestää kaikki edellä mainitut. Maapohjassa
voi tapahtua monenalaista liikettä, jotka ovat seurauksia esimerkiksi konsolidaatiosta, pai-
sumisesta, viereisistä kuormituksista, hiipuvasta maasta, maan liukusortumista tai maan-
järistyksistä. Nämä aiheuttavat paaluihin negatiivista vaippahankausta, nousua, venymiä,
poikittaisia ja siirtymiä. (RIL 207-2017.)

Suoraan asennetut paalut ottavat pystyvoimia vastaan, kun taas vinopaalut ottavat vaaka-
voimia. Pystyvoimat tulevat ylläolevista rakenteista. Vaakavoimia voi syntyä paalun liik-
kuessa maaperässä tai kun maa siirtyy paalua vasten, syntyy jarrukuormista tai lämpöliik-
keestä aiheutuvia rasituksia. Poikittaisia kuormia voivat aiheuttaa esimerkiksi penkereet,
vaihtelevat kaivuutasot tai paalutusperustus luiskassa, jossa virumaa. (Liikennevirasto.
2017.) Kuvassa 2.6 on esitetty paaluun vaikuttavia kuormituksia.



Kuva 2.6 Paaluun vaikuttavat kuormitukset. (Kuva: RIL 223-2005.)

Negatiivinen vaippahankaus saa alkunsa paalua ympäröivän maan painuessa enemmän kuin itse paalu. Vaippahankauksen laskennassa käytetään leikkauskestävyyttä maan ja paalun vaipan rajapinnalla ja otetaan huomioon maapohjan alaspäin suuntautuva liike. Maapohja painuu alaspäin omasta painosta ja ympärillä olevasta pintakuormasta aiheutuvasta kokoonpuristumisesta. Negatiivinen vaippahankaus on otettava huomioon pehmeissä savimaissa, koska nämä aiheuttavat paalua asennettaessa ensin maanpinnan nousua ja sen jälkeen painumaa. Voidaan olettaa, että negatiivisen vaippahankauksen mitoitusarvo on suurin piirtein 70-100 % suljetun leikkauslujuuden ominaisarvosta. (RIL 254-2016.)

2.3 Paalun geotekninen mitoitus

2.3.1 Eri mitoitustavat

Paalun geotekninen mitoitus voidaan tehdä neljällä eri tavalla; staattisten koekuormitusten tuloksilla, dynaamisten koekuormitusten tuloksilla, kokemusperäisiin tai analyttisiin laskentamenetelmiin, tai kokemukseen vastaavanlaisesta paaluperustuksesta perustuvalla mitoituksella. Puristuskestävyyden mitoitus voidaan tehdä staattisten koekuormitusten tulosten avulla, jos pystytään osoittamaan näiden täsmäävän kyseisessä kohteessa. Mitoitus voidaan myös tehdä kokemusperäisin tai analyttisin laskentamenetelmin, ja tämä varmistetaan staattisella tai dynaamisella koekuormituksella. Mikäli käytössä on yleisesti

hyväksytty analyyttinen laskentamenetelmä, koekuormituksia ei tarvita. Yleensä käytetään tyypillisiä geometrisiä parametrejä pohjatutkimusten perusteella, mutta joskus myös koekuormitusten tuloksia hyödynnetään parametrivalinnassa. Geometrisiä parametrejä ovat esimerkiksi kitkakulma, tilavuuspaino, leikkauslujuus ja huokospaine. (RIL 207-2017.)

Paalut voidaan myös mitoitaa kokemuksen perusteella, eli käyttää samanlaisen kohteen tietoja hyväksi. Paalujen puristuskestävyys voidaan arvioida paalutuskasvaiden kanssa, mikäli kohteessa on määritetty maakerrosrajat. Paalutuskasviaita käyttäessä on tehtävä lyöntikokeita vähintään viidelle paalulle, jotta saadaan määriteltyä soveltuvat loppulyöntimäärät. Iskuaaltoyhtälöanalyysi on tapa, jolla niin ikään voidaan määrittää paalujen puristuskestävyys, tosin ainoastaan, kun maakerrosrajat on määritetty kairauksilla ja kentäkokeilla. Iskuaaltoyhtälöanalyysi perustuu matemaattiseen malliin, jossa yhdistetään maa, paalu ja lyöntilaitteisto, eikä iskuaaltomittauksia tehdä kohteessa. Iskuaaltoteorian käytännön sovelluksilla voidaan arvioida järkeen toimivuutta ja tarvittava lyöntivastus eli lyöntimäärä, joka myös vaikuttaa paalun puristuskestävyyteen. Sovelluksilla voidaan myös arvioida dynaamisia maaparametrejä ja jännityksiä. (RIL 207-2017.)

Pohjatutkimusten perusteella arvioitu paalun puristuskestävyys voidaan jakaa seuraaviin askeliin RIL 207-2017 mukaan.

1. Pohdi rakennuksen ominaisuuksia ja mahdollista sortumista
2. Valitse seuraamusluokka, luotettavuusluokka sekä määrittele kuormakerroin
3. Määritä osavarmuuslukujen avulla pysyvät ja muuttuvat kuormitukset sekä mitoituskuorma $F_{c;d}$
4. Selvitä pohjaolosuhteet
5. Valitse paalukoko
6. Arvioi negatiivinen vaippahankaus
7. Valitse paalutussyvyys

Tämän jälkeen käytetään joko mallipaalumenetelmää tai vaihtoehtoista menetelmää, jotta saadaan laskettua paalun puristuskestävyys. Mallipaalumenetelmä on ensisijainen menetelmä. Vaihtoehtoista menetelmää ei käytetä Suomessa, joten sitä ei esitellä tässä.

2.3.2 Mallipaalumenetelmä

Puristuskestävyys voidaan määritellä pohjatutkimusten avulla kahdella eri menetelmällä, mallipaalumenetelmällä ja ns. vaihtoehtoisella menetelmällä. Paalutusohje 2016 mukaan mallipaalumenetelmällä lasketaan puristuskestävyys, kuten seuraavassa esitetään. Paalun puristuskestävyyden mitoitusarvo $R_{c;d}$, tulee laskea (RIL 254-2016):

$$R_{c;d} = R_{b;d} + R_{s;d} \quad (3)$$

jossa $R_{b;d}$ on paalun kärkikestävyyden mitoitusarvo ja $R_{s;d}$ on paalun vaippakestävyyden ominaisuusarvo. Kärkikestävyyden mitoitusarvo saadaan yhtälöstä (RIL 254-2016):

$$R_{b;d} = R_{b;k} \div \gamma_b \quad (4)$$

jossa $R_{b;k}$ on paalun kärkekestävyyden ominaisuusarvo ja γ_s on paalun kärkekestävyyden osavarmuusluku. Vaippakestävyyden mitoitusarvo saadaan yhtälöstä (RIL 254-2016):

$$R_{s;d} = R_{s;k} \div \gamma_s \quad (5)$$

jossa $R_{b;k}$ on paalun vaippakestävyyden ominaisuusarvo ja γ_s on paalun vaippakestävyyden osavarmuusluku. Paalun puristuskestävyyden ominaisarvo $R_{c;k}$ saadaan yhtälöstä (RIL 254-2016):

$$R_{c;k} = (R_{b;k} + R_{s;k}) = \frac{R_{b;cal} + R_{s;cal}}{\xi} = \frac{R_{c;cal}}{\xi} = \min \left\{ \frac{(R_{c;cal})_{mean}}{\xi_3}; \frac{(R_{c;cal})_{min}}{\xi_4} \right\} \quad (6)$$

$R_{s;cal}$ on vaippakitka laskettuna maaparametrien koetuloksista murtorajatilassa ja $R_{b;cal}$ on paalun kärkekestävyys laskettuna pohjatutkimustuloksista murtorajatilassa. ξ_3 ja ξ_4 ovat korrelaatiokertoimia, jotka riippuvat tutkimusprofiilien lukumäärästä n , mitä suurempi n , sitä pienempi korrelaatiokerroin. Korrelaatiokertoimet ξ_3 ja ξ_4 on esitelty taulukossa 2.6.

Taulukko 2.6 Korrelaatiokertoimet ξ_3 ja ξ_4 ominaisarvon johtamiseksi pohjatutkimustuloksista, jossa n on tutkimusprofiilien lukumäärä. (RIL 207-2017.)

ξ kun $n=$	1	2	3	4	5	7	10
ξ_3	1,85	1,77	1,73	1,69	1,65	1,62	1,6
ξ_4	1,85	1,65	1,6	1,55	1,5	1,45	1,4

Kun arvioidaan pohjatutkimuksiin perustuvaa laskentaa, on tarkasteltava muun muassa maalajia, sen rakeisuutta, minerologiaa, kulmikkuutta, tiheyttä, esikonsolidaatioastetta, kokoonopuristuvuutta ja vedenläpäisyvyyttä. Paalun asennusmenetelmä on otettava huomioon, kuten myös paalun pituus, halkaisija, materiaali sekä paalun vaipan ja kärjen muoto. (RIL 254-2016.)

2.3.3 Mitoitus dynaamisten koekuormitusten perusteella

Puristuskestävyys voidaan myös määritellä dynaamisten koekuormitusten perusteella. Mikäli menetelmää käytetään, tulee tuloksia verrata vastaaviin kohteisiin, jossa käytetty staattista koekuormitusta samanlaisilla paaluilla. Lyöntivastus mitataan suoraan paikan päällä. Koekuormitusta tehdessä voidaan tehdä myös ns. signaalinsovitusta, jonka avulla saadaan tietoa vaippa- ja kärkekestävyydestä ja kuormapainumakäyttäytymisestä. (RIL 254-2016). Paalutusohje PO-2016 mukaisesti saadaan puristuskestävyyden mitoitusarvo $R_{c;d}$ kaavasta

$$R_{c;d} = R_{c;k} \div \gamma_t \quad (7)$$

γ_t on paalun kokonaiskestävyyden osavarmuusluku. Puristuskestävyyden ominaisarvo $R_{c;k}$ saadaan tällä menetelmällä kaavasta (RIL 254-2016):

$$R_{c;k} = \min \left\{ \frac{(R_{c;m})_{mean}}{\xi_5}; \frac{(R_{c;m})_{min}}{\xi_6} \right\} \quad (8)$$

ξ_5 ja ξ_6 ovat korrelaatiokertoimia, jotka riippuvat koekuormitettujen paalujen lukumäärästä n , mitä suurempi n , sitä pienempi korrelaatiokerroin. Taulukossa 2.7 on esitelty korrelaatiokertoimien ξ_5 ja ξ_6 arvot, ja ne pätevät dynaamisille koekuormituksille. Mikäli

käytetään signaalinsovitusta tai mikäli paalut tukeutuvat varmistettuun kallioon, voidaan ξ -arvo kertoa luvulla 0,9. Mikäli käytetään paalutuskavaa, ξ -arvo kerrotaan joko luvulla 1,1 tai 1,2 riippuen mitataanko paalun pään näennäiselastista joustoa. $R_{c,m}$ on paalun geotekninen puristuskestävyys murtorajatilassa, joka on mitattu arvo yhden tai useamman paalun koekuormituksesta.

Taulukko 2.7 Korrelaatiokertoimien ξ_5 ja ξ_6 arvot ominaisarvojen johtamiseksi dynaamisista koekuormituksista. (RIL 207-2017)

ξ kun n	≥ 2	≥ 5	$\geq 10/50 \%$	≥ 15	$\geq 20/100 \%$
ξ_5	1,6	1,5	1,45	1,42	1,4
ξ_6	1,5	1,35	1,3	1,25	1,25

Ominaisarvot paalun kärkikestävyyden ominaisarvolle $R_{b,k}$ ja paalun vaippakestävyyden ominaisarvolle $R_{s,k}$ voidaan saada seuraavilla kaavoilla (RIL 254-2016):

$$R_{b,k} = A_b q_{b,k} \quad (9)$$

$$R_{s,k} = \sum_i A_{s,i} \times q_{s,i,k} \quad (10)$$

Jossa $q_{b,k}$ ja $q_{s,i,k}$ ovat maaparametrien perusteella päätetyt kärkikestävyyden ja vaippakitkan ominaisarvot eri maakerroksissa. A_b on paalun pohjan ala ja $A_{s,i}$ on paalun vaipan pinta-ala kerroksessa i . Kärkikestävyyden ominaisarvo voidaan laskea (RIL 254-2016):

$$q_b = \sigma'_{v,b} \times N_q \quad (11)$$

N_q = paalun kärjen kantavuuskerroin, saadaan kuvasta 2.7.

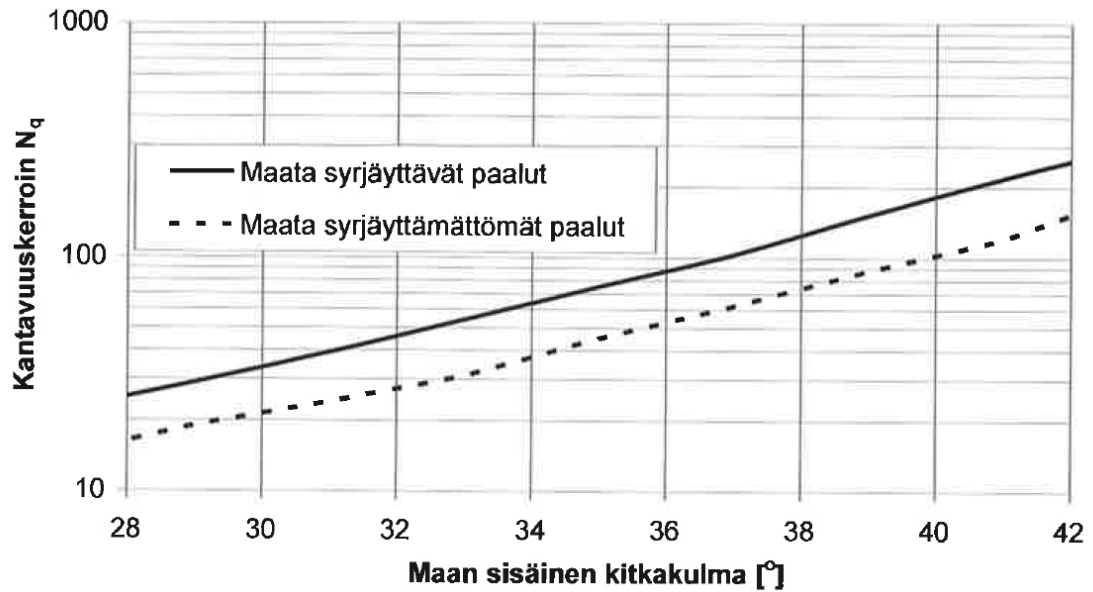
$\sigma'_{v,b}$ = tehokas pystysuora jännitys paalun kärjen tasolla, lasketaan maakerrosten paino 6 metrin matkalta paalun yläpuolelta, kuitenkin korkeintaan 15 MN/m².

Vaippakitkan ominaisarvo voidaan laskea (RIL 254-2016.):

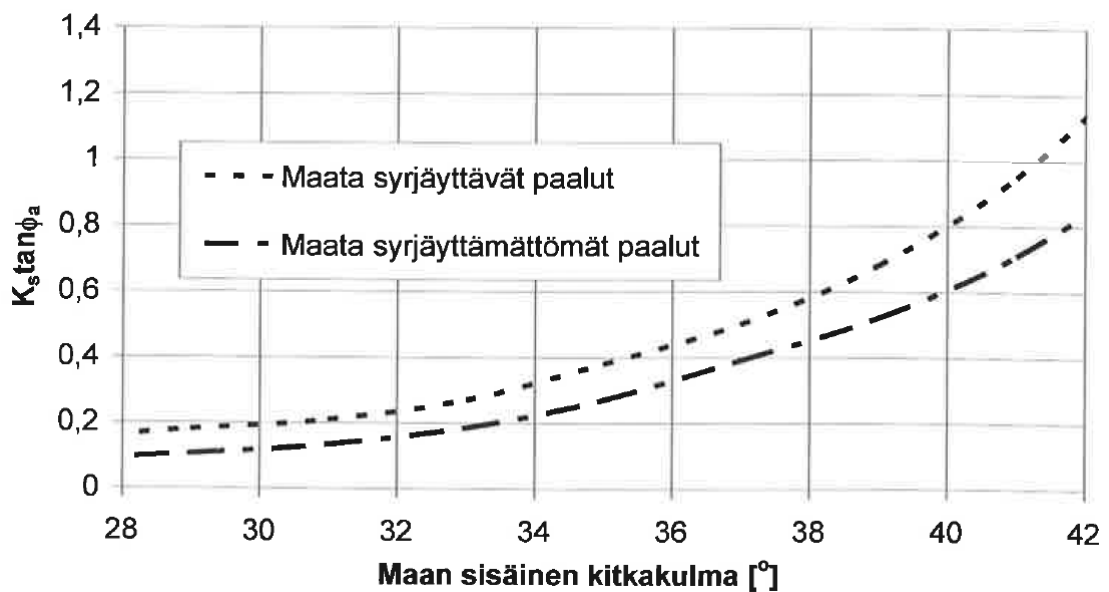
$$q_{s,i} = \sigma'_{v,i} \times K_s \times \tan \varphi_a \quad (12)$$

$\sigma'_{v,i}$ = tehokas pystysuora jännitys paalun vaipalla maakerroksessa i .

$K_s \tan \varphi_a$ = paalutyypistä ja maan sisäisestä kitkakulmasta riippuva vaippakestävyysskerroin, saadaan kuvasta 2.8.



Kuva 2.7 Kantavuuskerroin N_q maan sisäisen leikkauskestävyyskulman funktiona. (Kuva: RIL 254-2016.)



Kuva 2.8 Paalun vaippakestävyyskerroin $K_s \tan \phi_a$ maan sisäisen leikkauskestävyyskulman funktiona. (Kuva: RIL 254-2016.)

2.3.4 Iskuaaltoteoria

Paalujen dynaaminen koekuormitus, PDA-mittaus, perustuu iskuaaltoteoriaan. Iskuaalto-teorissa käsitellään pitkää, poikkileikkaukseltaan muuttumatonta isotrooppista sauvaa, ja paalu voidaan olettaa tällaiseksi ideaalimallissa. Ympäröivää maata ei huomioida tässä. Iskuaaltoteoriassa paalua lyöessä syntyy paalun yläpäähän jännityskenttä, joka aiheuttaa paalun kuormitetun osan kokoonpuristumaa. Paalu oletetaan koostuvan useammasta kerroksesta, ja kokoonpuristuma etenee sitten kerroksesta toiseen, ja täten iskuaalto etenee paalussa puristus- tai vetoaaltona. Iskuaaltoteoriassa otetaan ainoastaan huomioon värähtelyt paalun pitkittäissuunnassa, poikittaisten muodonmuutosten voidaan olettaa olevan pieniä. (Seppälä. 1993.)

Iskuaallon liikeyhtälön ratkaisu voidaan johtaa, kuten Seppälän kirjassa on esitetty. Newtonin toinen laki voidaan kirjoittaa (Seppälä. 1993.):

$$dF = dma = dm \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (13)$$

Tällöin paalun dx-pituuden osan liikeyhtälö on (Seppälä. 1993.):

$$F - (F + \frac{\partial F}{\partial x} dx) = (\rho A dx) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (14)$$

Hooken laki on voimassa lineaarisesti kimmoiselle materiaalille, kun materiaali jännitykset ovat suhteellisuusrajaa pienemmät (Seppälä. 1993.):

$$\sigma = E\epsilon = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (15)$$

Yhdistämällä yhtälöt 14 ja 15 saadaan (Seppälä. 1993.):

$$-\frac{\partial F}{\partial x} = EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (16)$$

Iskuaallonnopeus saadaan yhtälöstä (Seppälä. 1993.):

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (17)$$

Ja täten iskuaallon liikeyhtälöksi (Seppälä. 1993.):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (18)$$

Tällöin iskuaallon liikeyhtälön ratkaisu voidaan kirjoittaa (Seppälä. 1993.):

$$u(x, t) = u \downarrow (x - ct) - u \uparrow (x + ct) \quad (19)$$

Ratkaisu esittää kaksi iskuaaltoa, jotka liikkuvat vastakkaisiin suuntiin nopeudella c. Kitka ja paalun sisäinen vaimennus eivät vaikuta iskuaaltoon, joten se kulkee vaimentumatta koko paalun pituuden matkan. (Seppälä. 1993.)

Sauvan partikkelinopeus saadaan derivoimalla siirtymä u(x,t) ajan suhteen seuraavasti, kuten Seppälä esitti kirjassaan johtaessaan PDA-mittauksen peruskaavat (Seppälä. 1993.):

$$v(x, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u \downarrow}{\partial (x-ct)} (-c) + \frac{\partial u \uparrow}{\partial (x+ct)} (+c) = v \downarrow + v \uparrow \quad (20)$$

Hooken lain avulla saadaan paalussa vaikuttava voima (Seppälä. 1993.):

$$F(x, t) = -EA \frac{\partial u}{\partial x} = -EA \frac{\partial u \downarrow}{\partial (x-ct)} - EA \frac{\partial u \uparrow}{\partial (x+ct)} = F \downarrow + F \uparrow \quad (21)$$

Yhdistämällä yhtälöt 20 ja 21 saadaan (Seppälä. 1993.):

$$F \downarrow = -EA \frac{v \downarrow}{-c} = Zv \downarrow \quad (22)$$

$$F \uparrow = -EA \frac{v \uparrow}{+c} = Zv \uparrow \quad (23)$$

jossa $Z = EA/c$ = paalun impedanssi

Kahden edellisen avulla saadaan peruskaavat PDA-mittaukselle (Seppälä. 1993.):

$$F = F \downarrow + F \uparrow \quad (24)$$

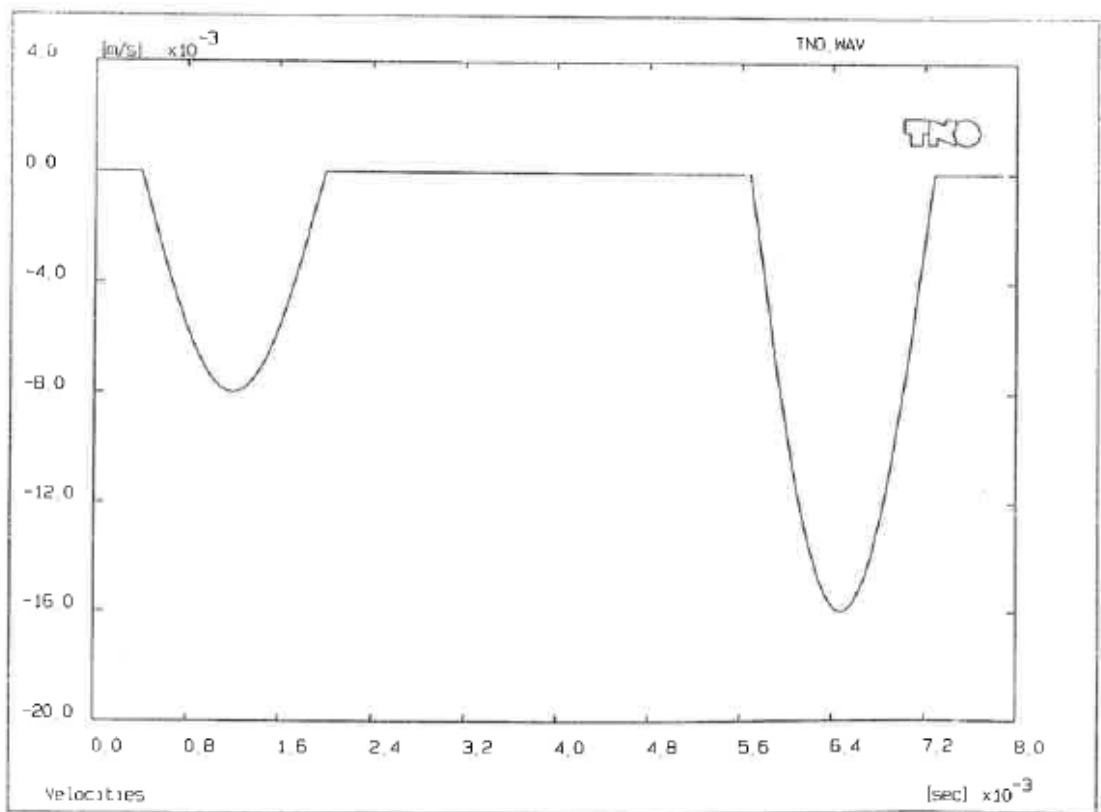
$$Zv = F \downarrow - F \uparrow \quad (25)$$

$$F \uparrow = (F - Zv)/2 \quad (26)$$

$$F \downarrow = (F + Zv)/2 \quad (27)$$

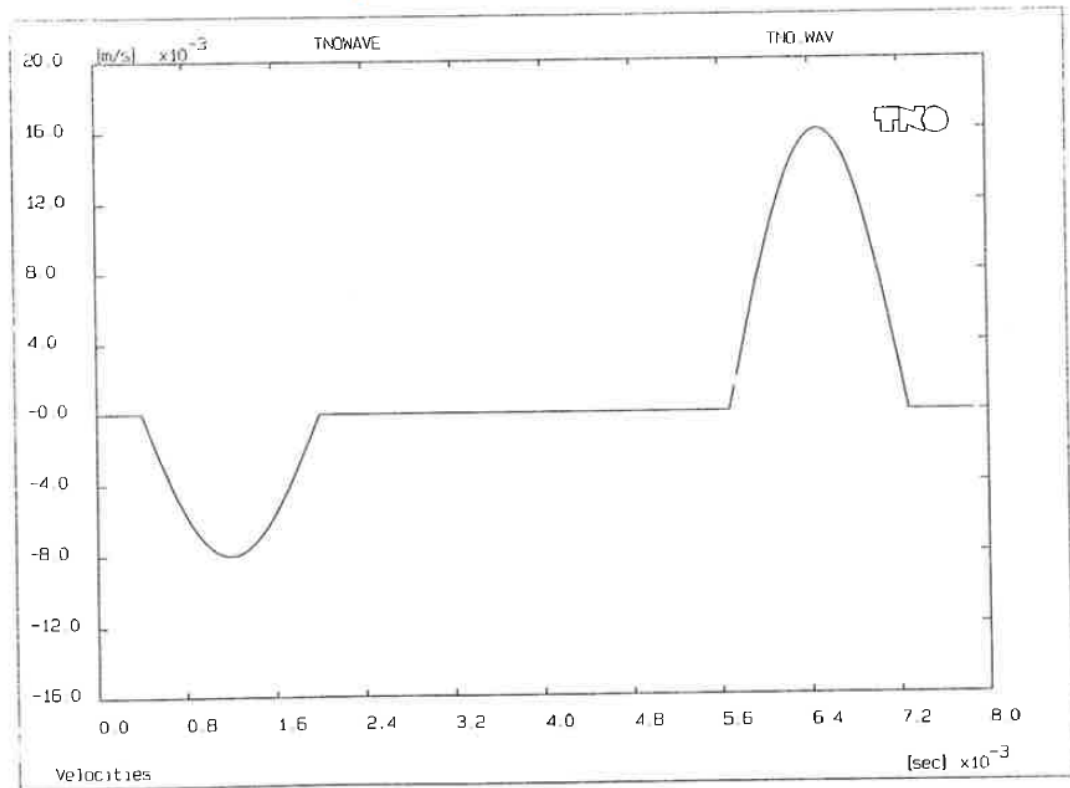
Reunaehdot yhtälöille saadaan ajanhetkellä $t=0$ paalun yläpäästä ja ajanhetkellä $t=L/c$ paalun alapäästä.

Mikäli paalu painuu, ehdot paalun yläpäässä ovat $x = 0$ ja $t = 0$ ja paalun kärjessä $F = F \uparrow + F \downarrow = 0$. Tällöin nopeuskuvaaja kuten kuvassa 2.9. Teoriassa kärjen nopeus on tällöin kaksinkertainen verrattuna alkuiskuaallon nopeuteen. Kuitenkin käytännössä nopeus on alle tämän, maaperän vaikutuksen ja paalumateriaalin takia. (Seppälä. 1993.)



Kuva 2.9 Paalu painuu. Kärjen nopeus noin kaksinkertainen alkuiskuaallon nopeuteen verrattuna. (Kuva: Seppälä. 1993.)

Mikäli paalu painuu, ehdot paalun yläpäässä ovat $x = 0$ ja $t = 0$ ja paalun kärjessä $v = v_{\uparrow} + v_{\downarrow} = 0$. Tällöin voima paalun kärjessä on noin kaksinkertainen verrattuna voimaan, jonka alkuiskuaalto aiheuttaa. Tämän voi nähdä kuvasta 2.10. (Seppälä. 1993.)



Kuva 2.10 Paalu ei painu. Kärjessä vaikuttava voima noin kaksinkertainen alkuiskuaallon aiheuttamaan voimaan verrattuna. (Kuva: Seppälä. 1993.)

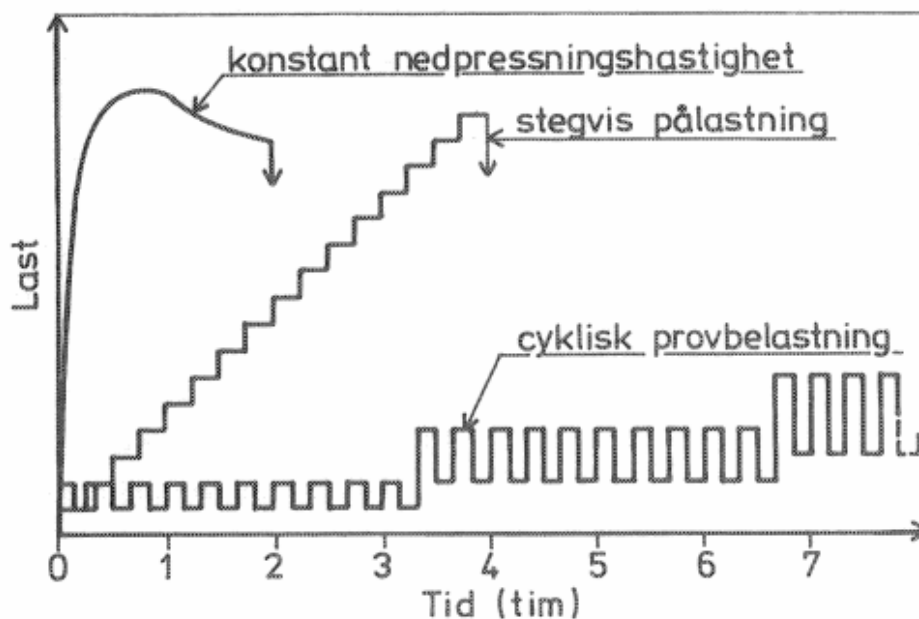
3 Paalujen koekuormitus

3.1 Koekuormitukset yleisesti

Eurokoodin geoteknisen suunnitteluohjeen RIL 207-2017 mukaan paalujen koekuormituksia käytetään, mikäli käytössä uudenlainen paalutyyppi tai asennusmenetelmä, mikäli paaluja ei ole aikaisemmin koekuormitettu vastaavissa pohja- ja kuormitusolosuhteissa, mikäli teoria ja kokemus eivät anna tarpeeksi varmuutta kuormitukseen liittyvään mitoitukseen tai mikäli paalujen asennuksen aikana huomataan paalujen käyttäytyvän erikoisella tavalla ja pohjatutkimukset eivät selitä syytä. Koekuormituksella voidaan todeta rakentamismenetelmän soveltuvuus kohteeseen, voidaan määrittää paalun kuormitusvaste sekä painuman että rajakuorman suhteen, ja voidaan yleisesti arvioida koko paaluperustusta. Koekuormitukset eivät sovellu aina kaikkiin kohteisiin, esimerkiksi mikäli kohteen kuormitus on syklistä, joudutaan arvioimaan materiaaliominaisuudet varovaisesti.

Koekuormitukset jaetaan yleensä kahteen luokkaan, staattiset koekuormitukset ja dynaamiset koekuormitukset. Paalutusohje 2016 mukaisesti paalutustyöluokassa 3 on aina suoritettava koekuormituksia, ehjyyskokeita tai valvontakokeita. Näiden avulla saadaan tietoa paalun geoteknisestä kestävyydestä sekä paalun rakenteen ehjyydestä. Myös muissa paalutusluokissa suunnittelija voi määrätä koekuormituksia tehtäväksi.

Staattiset koekuormitukset voidaan jakaa neljään erilaiseen koekuormitukseen: portaattainen koekuormitus, koekuormitus vakionopeudella, syklinen koekuormitus ja pitkäaikaiskoekuormitus vakiokuormalla. Nämä eri tavat on esitelty kuvassa 3.1, jossa pystyakselilla on kuorma ja vaaka-akselilla aika mitattuna tunneissa. Portaattaisessa koekuormituksessa portaattaset asetetaan noin 5 prosentiksi lasketusta murtorajatilasta, ja kuormaa kasvatetaan 15 minuutin välein. Koetta jatketaan, kunnes paalun painuma on vähintään 60 millimetriä. (Olsson, Holm. 1993.)



Kuva 3.1 Staattiset koekuormitustavat esiteltynä kuorma-aika-kuvaajassa: koekuormitus vakionopeudella (konstant nedpressningshastighet), portaattainen koekuormitus (stegvis pålastning) sekä syklinen koekuormitus (cyklisk provbelastning). Kuva: Pålgrundläggning, Olsson & Holm, 1993.

Koekuormituksessa vakionopeudella paalua painetaan alaspäin matalalla nopeudella, yleisesti 0,5 mm/min. Kuormitus päätetään samoihin ehtoihin kuin portaittainen koekuormitus, eli painuman ollessa yhteensä 60 millimetriä. Syklisessä koekuormituksessa pyritään määrittämään paalun viruma, ja koko kuormitus kestää 15-20 tuntia. Pitkäaikaiskoekuormitus vakiokuormalla voi taas kestää yhdestä päivästä vuoteen, tällöin valitaan kuormaksi hieman portaittaisessa koekuormituksessa käytettyä maksimikuormaa pienempi kuorma. (Olsson, Holm. 1993.)

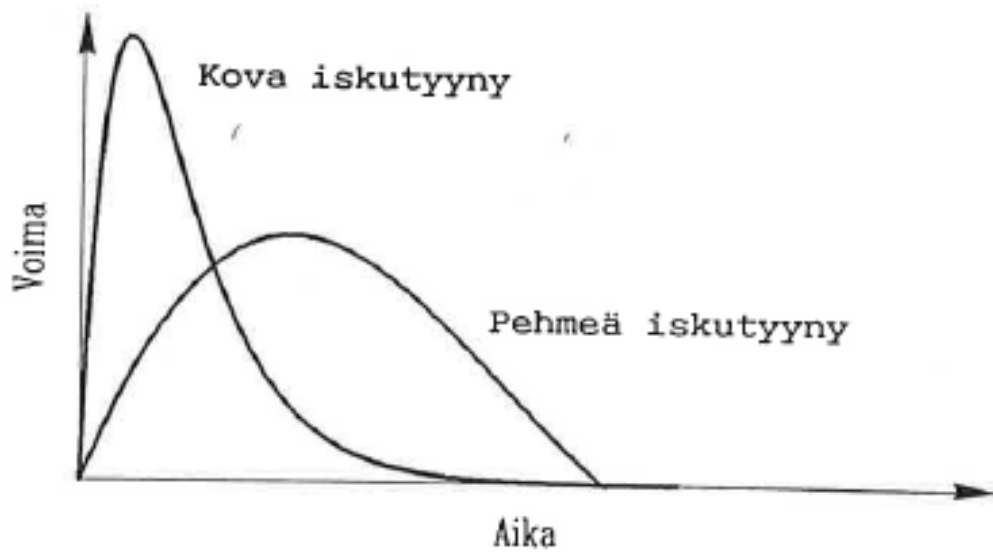
Staattista koekuormitusta ei voi tehdä heti paalun asennuksen jälkeen, kitkamaalajeissa on odotettava vähintään kolme päivää, ja koheesiomaalajeissa vähintään kolme viikkoa (Pfähle, 2014). Staattinen koekuormitus vastaa enemmän todellista kuormitustilannetta kuin dynaaminen koekuormitus. Suomessa käytetään kuitenkin enemmän dynaamista koekuormitusta kuin staattista koekuormitusta, sillä staattinen koekuormitus on kalliimpi, hitaampi ja vaatii erityisen suuria koekuormitustunkkeja, ja on täten vaikeampi toteuttaa.

Dynaamisen koekuormituksen avulla saadaan selville paalun puristuskestävyys, edellyttäen että pohjatutkimukset ovat riittävät ja menetelmä on kalibroitu staattisella koekuormituksella samantyyppisillä, samanmittaisilla ja vastaavan poikkileikkausalan omaavilla paaluilla. Myös paalun ehjyys ja kantavuudeltaan heikot paalut voidaan saada selville. (RIL 207-2017.) Dynaamisessa koekuormituksessa paalutuskoneen lyöntilaite aiheuttaa iskuaallon, joka kulkee paalun sisällä, tätä mittaustapaa kutsutaan iskuaaltomittaukseksi. Kun aiheutuneet muodonmuutokset ovat suuret, puhutaan ns. ”high strain” (suom. suuri painuma) -menetelmästä tai Pile Driving Analyzer -mittauksesta (suom. paalutuksen analysointi), lyhyemmin PDA-mittauksesta (Liikennevirasto. 2016).

3.2 PDA-mittauksen käyttö

PDA-mittauksella määritellään ensisijaisesti paalun geotekninen kantavuus. Alun perin PDA-mittaus kehitettiin täydentäväksi ja myöhemmin korvaavaksi menetelmäksi kaliummalle staattiselle koekuormitukselle. Tulokseksi PDA-mittauksesta saadaan paalun vastus murtorajatilassa. Nykyisin dynaamista koekuormitusta käytetään myös paljon laajemmin kuin ainoastaan kantavuuden määrittämiseksi. Koekuormitusta käytetään myös lyöntivasaran toimintakyvyn mittaamiseen, asennuksen aikaisiin veto- ja puristusjännitysten määrittämiseen sekä paalun ehjyyden tarkastamiseen. (Likins, 1984.) Mittauksesta nähdään myös lyönnin keskeisyys ja iskutyynyn kunto. Mittaustulosten avulla voidaan määritellä paaluille loppulyöntiohjeet. (Seppälä. 1993.)

PDA-mittausta voidaan käyttää teräspaaluille, teräsbetonipaaluille, puupaaluille, sekä maata syrjäyttämättömille suurpaaluille. Käytettävä kalusto on teräsbetonisten paalujen osalla pudotusjärkeleet tai hydraulivasara, suurien teräspaalujen kohdalla vastaavasti rasakat pudotusjärkeleet, dieseljuntat sekä hydraulivasara. Paineilmavasara, jota käytetään esimerkiksi asennettaessa pieniä teräspaaluja, ei ole välttämättä soveltuva sen suuren iskunopeuden takia. Paalutuksessa käytettävä iskutyyny vaikuttaa myös PDA-mittauksen tulokseen, pehmeä iskutyyny ei anna tulokseksi yhtä suurta maksimivoimaa kuin kova iskutyyny, katso kuva 3.2. (Seppälä. 1993).



Kuva 3.2 Iskutyynyn vaikutus maksimivoimaan iskuaaltokäyrässä. (Kuva: Seppälä, 1993.)

Suurpaalut ovat kaivinpaaluja, jotka tehdään kaivamalla maahan paalukaivanto, joka täytetään joko raidoitettulla tai raudoittamattomalla betonilla (RIL 254-2016). Suurpaaluille tehdään PDA-mittaus vasta anturan kovettumisen jälkeen, ja tällöin tämä tehdään pudotusjärjäläellä. Suurpaaluissa saattaa olla vaikeaa saada tarpeeksi suuri lyöntienergia, ja paalun kärkivastusta on vaikea saada mobilisoitua täydellisesti. (Seppälä. 1993.)

Menetelmällä saadaan huomattavasti nopeammin tuloksia kuin staattisella koekuormituksella ja se on helpompi toteuttaa. Päivässä ehditään mittaamaan useita paaluja. Toisaalta menetelmällä ei saada ajasta riippuvaa painumatietoa samalla tavalla kuin staattisella koekuormituksella, joten käyttörajatilaan liittyviä kannanottoja on tehtävä varauksella. (Pfähle. 2014.) PDA-mittaus on edullinen ja nopea koekuormitustapa, eikä se keskeytä varsinaista paalutustyötä, kuten verraten staattinen koekuormitus. Mittaustulokset saadaan nopeasti, ja suunnittelija voi heti määritellä uudet loppulyöntikriteerit kohteelle.

PDA-mittaus on eniten käyttökelpoinen kitkamaalajeissa, mutta myös koheesiomaalajeissa tietyin rajoituksin. Esimerkiksi kyllästeisessä, löyhässä hiekassa tai konsolidoitu-neissa koheesiomaalajeissa tulokset saattavat olla epätarkkoja. PDA-mittaus on myös ai-noa tapa mitata paaluja rannikko- ja ulkomerisovelluksissa, koska näissä kohteissa staattisen kuormituskokeiden hyvin vaativat tekniset valmistelut eivät ole mahdollisia. (Pfähle. 2014)

PDA-mittauksesta on paljon hyötyjä työmaalla, sekä ajallisia että rahallisia. Kun saavutetaan geotekninen kantavuus kevennetyillä loppulyöntimäärillä, on mahdollista optimoida paalupituutta, eli käytännössä lyhentää paaluja, mikä vähentää materiaalikustan-nuksia. Paalutuskalustoa voidaan myös arvioida PDA-mittauksen tulosten avulla. Saa-daan lisätietoa lyöntivasaran tehokkuudesta sekä iskutyynyn ominaisuuksista, ja miten nämä vaikuttavat paaluun ja siihen siirtyvään iskuenergiaan. (Seppälä. 1993.)

Paalun ehjyyttä voidaan myös arvioida PDA-mittausten avulla. Paalun kunto arvioidaan ns. β -luvulla, jossa 100 % tulos tarkoittaa ehjää paalua. Lievästi vaurioitunut paalu saa β -luvun 80-100 %, vaurioitunut paalu 60-80 % ja pahoin vaurioituneen paalun β -luku on

alle 60 %. Riippuen vaurioiden vakavuudesta, paalu saatetaan joutua korvaamaan. Lievät vauriot eivät suuresti haittaa paalun toimintaa, ja pienet halkeamat betonissa voivat jopa korjautua itseksensä. β -luvun ollessa alle 80 % tulisi paalun soveltuvuutta kuitenkin arvioida. (Liikennevirasto. 2016.)

PDA-mittauksella saadaan myös karkean arvion, paljonko paalulla on kärkivastusta ja paljonko vaippavastusta. Kun määritellään pudotuskorkeus uudestaan, voidaan mahdollisesti käyttää pienempää pudotusnopeusta kuin mitä taulukoissa on määritelty. Tämä tarkoittaa käytännössä, että paalu pystytään suuremmalla todennäköisyydellä asentaa vaurioitta, kun puristusjännitykset pysyvät pienempinä eikä paalua täten rasiteta yhtä paljon. (Repo, Riihimäki. 2018.)

Suunnittelun kannalta PDA-mittaus on kannattavaa, koska kantavuuden varmistamisella voidaan todeta suunnitelmat onnistuneiksi ja mahdollisesti sallia suurempia paalukuormia. Jos tehdään ns. signal matching (suom. signaalinsovitus) -analyysi voidaan todeta paalun vaippa- ja kärkivastus, ja näitä arvoja voidaan käyttää suunnittelussa esimerkiksi eri varmuuskertoimilla. Mikäli PDA-mittaus suoritetaan ennen itse työtä tehtävän koe-paalutuksen yhteydessä, voidaan todeta paalutyypin soveltuvuus sekä optimoida paalun pituuksia. (Seppälä. 1993.) Kuvassa 3.3 on esitelty pohjarakennesuunnittelijan, urakoitsijan, tilaajan ja mittaaajan roolit PDA-mittauksen yhteydessä.

Pohjarakennesuunnittelija	Urakoitsija	Tilaaja
<ul style="list-style-type: none"> • Määrittää mittaustarpeen ja mittausten menetelmät (yhteistyössä mittaajan kanssa) • Määrittää mitattavien paalujen lukumäärän • Valitsee mitattavat paalut • Esittää paaluille vaaditut R_{cm}-arvot, huomioden paalujen koekuormituksen aikaiset jännitykset • Määrittää paalujen alustavat tavoitetasot ja riittävän paalupituuden mittauksen suorittamiselle • Yhdessä urakoitsijan ja mittaajan kanssa suunnittelee/määrittää koepaalutuksen läpiviennin • Huomioi paalujen geoteknisen kestävyuden kehityksen mittausajankohtaa valittaessa • Määrittää tarvittavan koekuormituskaluston yhdessä mittaajan kanssa • Lukee ja hyväksyy koekuormitusraportin • On yhteydessä mittausten suorittajaan ja tilaajaan, mikäli herää kysymyksiä koekuormitusraportista 	<ul style="list-style-type: none"> • Ennen paalujen asennusta yhteydessä mittaajaan/ pohjarakennesuunnittelijaan paalujen asennusta koskien • Toimii yhteistyössä mittaajan ja pohjarakennesuunnittelijan kanssa • Täyttää paalutuspöytäkirjat asianmukaisesti ja raportoi poikkeamat • Toimittaa geotekniset piirustukset mittaajalle • Toimittaa paalutuspöytäkirjat mittaajalle ja suunnittelijalle • Toimii paalujen asennuksessa ja koekuormituksessa suunnittelijan ja mittaajan ohjeiden mukaisesti • Mittaa koekuormituksen aikana paalun pysyvän painuman jokaiselle koekuormitusiskulle • Toimii koekuormitusraportin ohjeiden mukaisesti 	<ul style="list-style-type: none"> • Hyväksyy suunnittelijan ehdotuksen mittauksen tarpeesta ja käytettävistä menetelmistä • Asettaa vaatimukset mittauksien suorittajalle ja suoritukselle • Hyväksyy mittauksen suorittajan ja suoritteen • Lukee ja hyväksyy koekuormitusraportin
Mittaaja		
<ul style="list-style-type: none"> • Suorittaa koekuormituksen ja raportoi mittaustulokset • Toimittaa mittausraportin urakoitsijalle ja pohjarakennesuunnittelijalle 		

Kuva 3.3 Eri toimijoiden tehtävät koekuormituksen suhteen. (Kuva: Liikennevirasto. 2016.)

3.3 PDA-laitteisto

PDA-laitteisto koostuu antureista, jotka on kiinnitetty paaluun, PDA-tietokoneesta sekä sähköisistä mittauslaitteista. Paalun yläpäähän kiinnitetään anturit, jotka on kytketty mittauslaitteisiin ja tietokoneeseen. Kun paalua lyödään järkäleellä, saadaan mitattua paalun yläpäässä vaikuttava voima ja partikkelinopeus, joiden avulla saadaan laskettua paalun alapäässä vaikuttava murtovoima. Heijastusaalto paljastaa paalun alapään murskautumisen ja paalun varressa olevat halkeamat. (Jääskeläinen. 2009.)

Anturit ovat joko liimattavia tai ruuvattavia antureita, joista pultattavat anturit tavallisimmat. Anturit tekevät tiedonsaannista helppoa ja edullista, koska ovat uudelleenkäytettäviä kaikenkokoisiin ja -tyyppisiin paaluihin. Koekuormituksessa käytetään kahta venymä- ja kiihtyvyysanturia, suuremmilla paaluilla useampaa. Antureiden asennus kestää yleensä alle 15 minuuttia. Tässä työssä käytetyt anturit ovat ruuvattavia antureita, ja näiden asennus selostetaan myöhemmin tässä työssä. Liimattavia antureita käytetään esimerkiksi paineilma- ja hydraulivasaroissa, kohteissa, jossa ruuvattavia antureita ei ole mahdollista käyttää. Signaali liimattavissa antureissa on hyvä, mutta ne ovat epäkäytännöllisempiä ja hankalempia käyttää. Liimattavat anturit ovat kertakäyttöisiä ja verrattuna ruuvattaviin antureihin kalliita, antureiden hinta on noin parikymmentä euroa per paalu. Niitä käytetään kuitenkin jossain määrin testeissä, teräspuutkipaaluissa tai esimerkiksi kalliokärkien testauksessa. (Repo, Riihimäki. 2018.)

Tietokoneella käsitellään signaalikäsittely-yksikön kautta tulevat antureiden signaalit. Signaalinkäsittely-yksiköllä tehdään iskuaaltomittauksen vaatimat säädöt. Yksikön toimittoja ovat esimerkiksi antureiden tasapainotus, signaalien vahvistuksen säätö, iskulasuri, integrointi, jälkivahvistus ja liikakuormahälytin. Mittaustuloksien luotettavuus on suhteellisen helppo määritellä kuvaajien perusteella, mikäli voima-signaalikäyrät ja nopeussignaalikäyrät sopivat hyvin yhteen, on luultavasti tulokset luotettavia. Huonoa yhteensopivuutta aiheuttaa esimerkiksi epäkeskeinen lyönti. Mikäli signaaleja ei voida tulkitä yksiselitteisesti, kantavuuden määrittelyä ei voida tehdä luotettavasti. Luotettavimmat tulokset saadaan, kun paalun kärki on karkearakeisessa maakerroksessa tai kalliossa, savi- ja silttimaalajeissa taas tuloksiin joutuu suhtautua varovaisemmin. (Seppälä. 1993.)

3.4 CASE-menetelmä

3.4.1 Paalun kantavuuden laskenta

PDA-laitteisto voi käyttää kolmea eri menetelmää laskeakseen paalun kantavuuden, CASE-, Impedanssi- tai TNO-menetelmää. Impedanssi- ja TNO-menetelmää ei käsitellä tässä työssä. Tässä työssä käytetty Pile Driving Analyzer®-Model 8G käyttää CASE-menetelmää. Se perustuu kokonaislyöntivastuksen R_T määrittämiseen voima- ja nopeus kertaa impedanssikäyrän avulla. Paalun staattinen vastus voidaan määritellä, kuten seuraavaksi esitetty Seppälän ohjeen mukaisesti.

Staattinen vastus (Seppälä. 1993.):

$$R_s = R_T - R_d \quad (28)$$

Dynaaminen vastus (Seppälä. 1993.):

$$R_d = J_c \times v_p \times Z_p \quad (29)$$

jossa J_c on CASE-vaimennuskertoin, v_p on paalun kärjen partikkelinopeus ja Z_p paalun impedanssi. Paalun impedanssi saadaan kaavasta (Seppälä. 1993.):

$$Z_p = \frac{Mc}{L} = \frac{E_p A_p}{c} \quad (30)$$

Kokonaislyöntivastus R_T saadaan voima- ja nopeuskäyrien avulla, kun sijoitetaan voiman ja nopeuden arvot yhtälöön (Seppälä. 1993.):

$$R_T = \frac{F(t_1)+F(t_2)}{2} + \frac{Mc}{2L}(v(t_1) - v(t_2)) \quad (31)$$

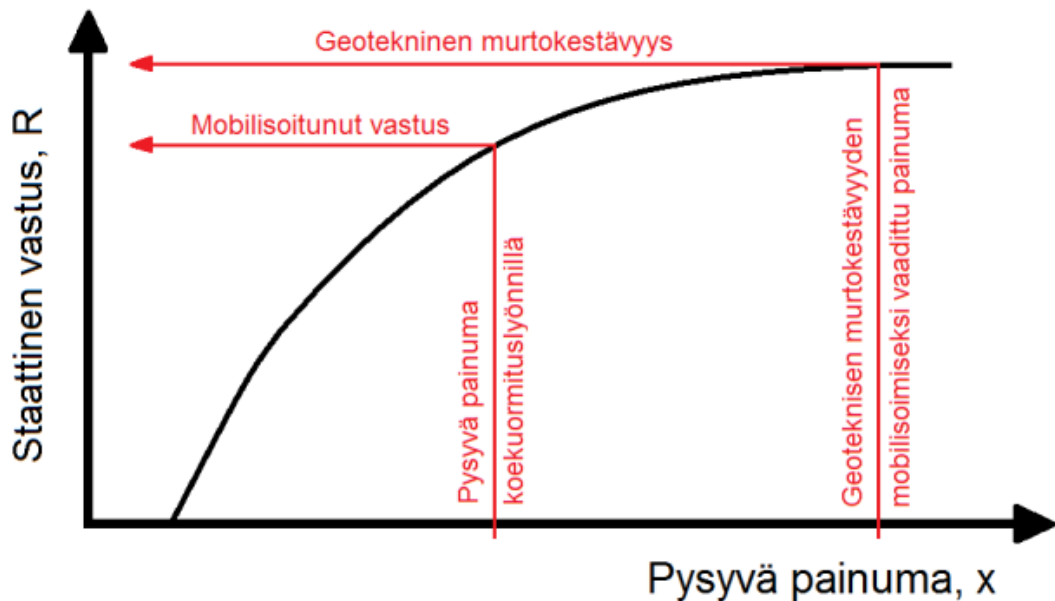
jossa t_1 on ajanhetki, kun maksimivoima ja maksiminopeus saavutetaan ja $t_2 = t_1 + 2L/c$

Staattinen vastus voidaan täten myös kirjoittaa muotoon (Seppälä. 1993.):

$$R_s = R_T - J_c(2F(t_1) - R_T) \quad (32)$$

Varmuuskerroin F on olosuhteista riippuva ja vaihtelee 2,0-2,5. Staattisen vastuksen mitaustulos, eli niin sanottu RMX-estimaatti, esitellään tarkemmin kohdassa 3.4.2.

Kun koekuormituskuista mitataan pysyvä painuma, pystytään arvioimaan, onko paalun geotekninen murtokestävyys mobilisoitunut. Oletetaan, että geotekninen murtokestävyys on saavutettu, kun paalulta mobilisoituva staattinen vastus ei enää kasva, vaikka paalun pysyvä painuma kasvaisi suuremmalla koekuormitusiskulla. Tämä on esitetty kuvassa 3.5. Paalun koko geoteknistä puristuskestävyyden kapasiteettia ei aina tarvitse mitata, ja tällöin pienemmät painumat koekuormituksen yhteydessä riittävät. (Liikennevirasto. 2016.)



Kuva 3.5 Paalun staattisen vastuksen mobilisoituminen koekuormituksessa aikaansaadun paalun pysyvän painuman suhteen. (Kuva: Liikennevirasto. 2016.)

Vaadittu painuma vaihtelee paalutyypin, paalun pituuden ja pohjaolosuhteiden mukaan, mutta voidaan kokemukseräisesti arvioida painuman s olevan luokkaa (Liikennevirasto. 2016.):

$$s = 5 \text{ mm} + \frac{d}{100} \text{ mm} \quad (33)$$

jossa d on paalun halkaisija.

3.4.2 RMX-estimaatti

Tässä työssä mainitut mittaukset on suoritettu PDA-laitteistolla, joka käyttää CASE-menetelmää ja niin sanottua RMX-estimaattia. RMX-estimaatti ilmaisee mittauksessa mobilisoituneen staattisen vastuksen, eli käytännössä paalun kantavuuden. RMX-estimaatti (Maximum Case Method) on yleisin CASE-menetelmän estimaatti, ja se hakee mitatusta voima-nopeus -kuvaajasta ajankohdan t_1 , jolloin paalussa on mitattu suurin staattinen vastus. RMX on kehittyneempi versio RSP-estimaatista (Standard Case Method), RSP-estimaatti antaa luotettavan tuloksen ainoastaan kohtalaisilla painumilla, kun taas RMX-estimaatti antaa myös hyvin suurilla ja pienillä painumilla luotettavan tulokset. Lisäksi on olemassa ns. RSU-estimaatti (Unloading method), mutta sitä ei käsitellä tässä työssä. Seuraavassa yhtälössä on esitetty staattisen vastuksen (RMX) kaava. (Liikennevirasto. 2016.)

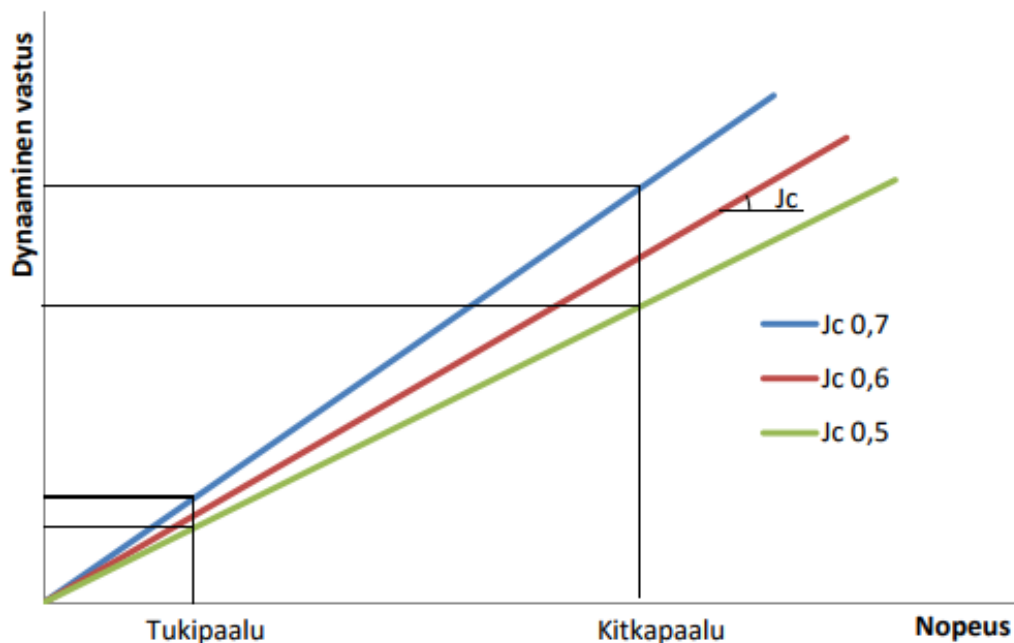
$$RMX = R_{tot} - J_c \left[V(t_1) \frac{E^*A}{c} + F(t_1) - R_{tot} \right] \quad (34)$$

3.4.3 Vaimennuskertoimen valinta

Vaimennuskerroin J_c on dimensioton ja valitaan maaperän mukaan, johon paalun kärki on pysähtynyt. Arvot ovat kokemuseräisiä, ja ne päätellään maaperän rakeisuuden ja tiiviyyden perusteella. Ohjeelliset arvot on saatu vertailemalla dynaamisia ja staattisia koe-kuormituksia. Vaimennuskerroin voidaan myös laskea tapauskohtaisesti paalumateriaalin ja maaperän ominaisuuksien avulla. Mikäli paalun kärki on kalliossa, dynaamista vaimennusta ei synny, koska paalun kärjen nopeus on nolla. Karkearakeisessa maaperässä dynaamisen vaimennuksen osuus on pieni verrattuna kokonaislyöntivastukseen, kun taas hienorakeisilla maalajeilla suuri. Tämä tarkoittaa, että vaimennuskertoimen pieni epätarkkuus ei haittaa karkearakeisessa maaperässä, kun taas hienorakeisessa tämä vaikuttaa merkittävästi laskennan tulokseen. (Seppälä. 1993.) Taulukossa 3.1 on esitetty vaimennuskertoimen J_c arvoja eri maalajeille. Kuvassa 3.5 on esitelty vaimennuskertoimen vaikutus paalun dynaamiseen vastukseen.

Taulukko 3.1 Vaimennuskertoimen arvoja CASE-menetelmän RMX-estimaatille maalajin mukaan (Liikennevirasto. 2016)

Maalaji	J_c
Hiekka (Hk)	0,40-0,50
Silttinen hiekka	0,50-0,70
Siltti (Si)	0,60-0,80
Silttinen savi (siSa)	0,70-0,90
Savi (Sa)	$\geq 0,90$



Kuva 3.5 Vaimennuskertoimen vaikutus paalun dynaamiseen vastukseen. (Kuva: Liikennevirasto. 2016.)

CASE-menetelmä perustuu siihen, että dynaaminen vaimennus vain keskittyy paalun kärkeen, joka tarkoittaa, että paalun tulisi käyttäytyä kuten tukipaalu, jotta menetelmä olisi luotettava. Seppälä toteaa kirjassaan, että kitka- ja koheesiopaalujen kantavuuden laskentaan menetelmän avulla on suhtauduttava kriittisesti.

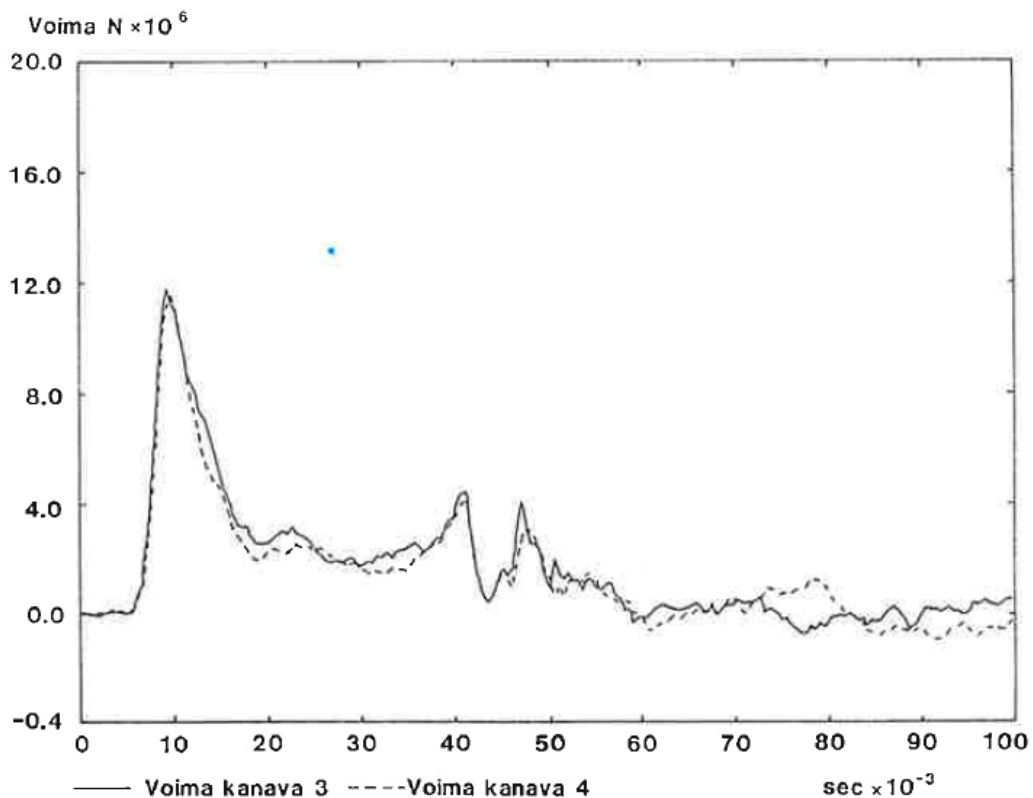
3.4.4 CAPWAP-analyysi

CAPWAP on yksi signaalimallinnuksessa käytettävistä ohjelmistoista, jonka kehittäjä on Pile Dynamics, Inc.. Muita ovat esimerkiksi TNOWAVE sekä SIMBAT. Signaalimallinnus, eli CAPWAP-analyysiä, käytetään, kun halutaan varmistaa vaimennuskertoimen J_c kyseiselle kohteelle tai halutaan määrittää, kuinka paljon kantavuudesta tulee kärjestä ja kuinka paljon vaipalta. Kitkapaaluille tehdään aina CAPWAP-analyysi, tukipaaluille tarvittaessa. Etenkin pehmeissä maalajeissa, joissa vaimennuskertoimen valinta on tarkempaa, voidaan suorittaa CAPWAP-analyysi. Mikäli herkkyytarkastelussa, eli eri vaimennuskertoimien antamilla RMX-arvoilla, eli kantavuudella, on yli 10 prosentin vaihtelua tuloksissa, tulee suorittaa CAPWAP-analyysi (Repo, Riihimäki. 2018).

Haastattelussa Riihimäen ja Repon kanssa ilmeni, että paalujen käyttäytyessä selkeästi tukipaaluina, CAPWAP-analyysistä ei oikeastaan ole muuta hyötyä, kun että saadaan paremmat korrelaatiokertoimet käyttöön. Paalu on selkeästi tukipaalu, kun kantavuus tulee kärkivastuksesta, paalu on tiukassa maaperässä ja painumat pieniä. Tavanomaisessa paalutuskohteessa, jossa paalut pysähtyvät selkeästi tiukkaan maaperään, vaimennuskertoimen valinta on usein helppoa. Myös mikäli paalu on upotettu kallioon, CAPWAP-analyysistä ei ole käytännön hyötyä. Pienempien korrelaatiokertoimien käyttö tarkoittaa käytännössä, että voidaan arvioida paalulle suurempi kantavuus.

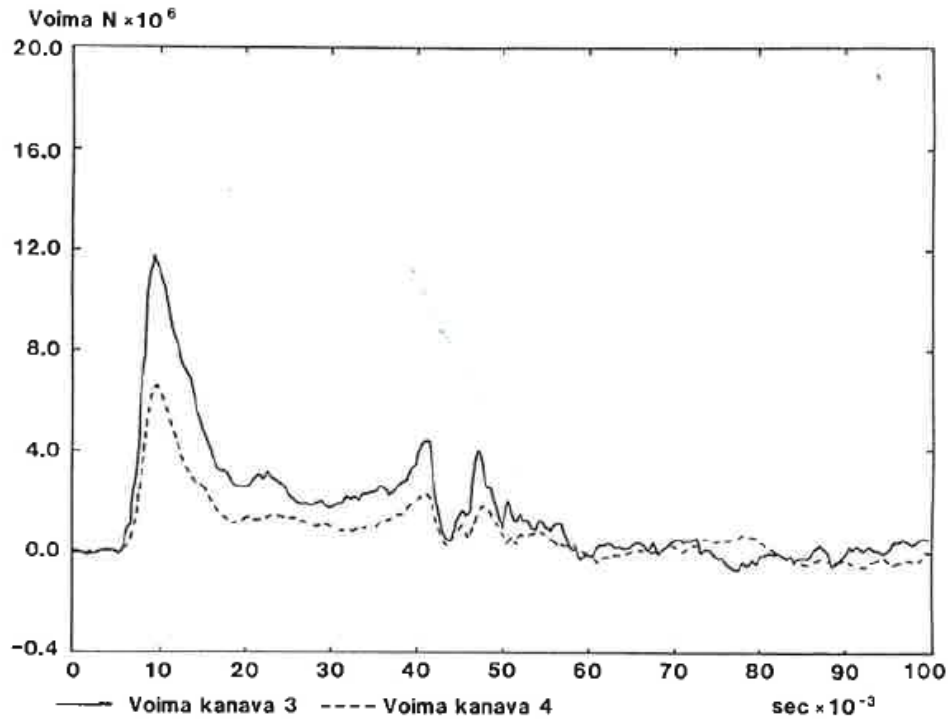
3.5 Kuvaajien tulkinta

PDA-mittauksessa tulokset saadaan voima- ja nopeussignaali kuvaajina. Tässä luvussa on selitetty tärkeimmät asiat mitä voi huomata ja todeta kuvaajista. Voima- ja nopeussignaali kuvaajien avulla voidaan päätellä signaalien yhteensopivuus ja täten mittauksen luotettavuus. Mikäli paalu kulkee heijastumatta alaspäin, ovat voima ja nopeus-signaalit päällekkäisiä. Esimerkki voimasignaali kuvaajista kuvissa 3.6 ja 3.7, kuvassa 3.6 hyvä yhteensopivuus ja kuvassa 3.7 huono yhteensopivuus. Yhteensopivuutta voidaan mitata FVP-arvolla, eng. force-velocity proportionality, eli voima-nopeus suhde. Mikäli voima ja nopeus saavuttavat saman arvon tietyssä kohdassa, FVP-arvo on 1. Noin 10 % ero on vielä hyväksyttävä, eli FVP:n arvo tulee olla 0,9 ... 1,1. (Liikennevirasto. 2016.)



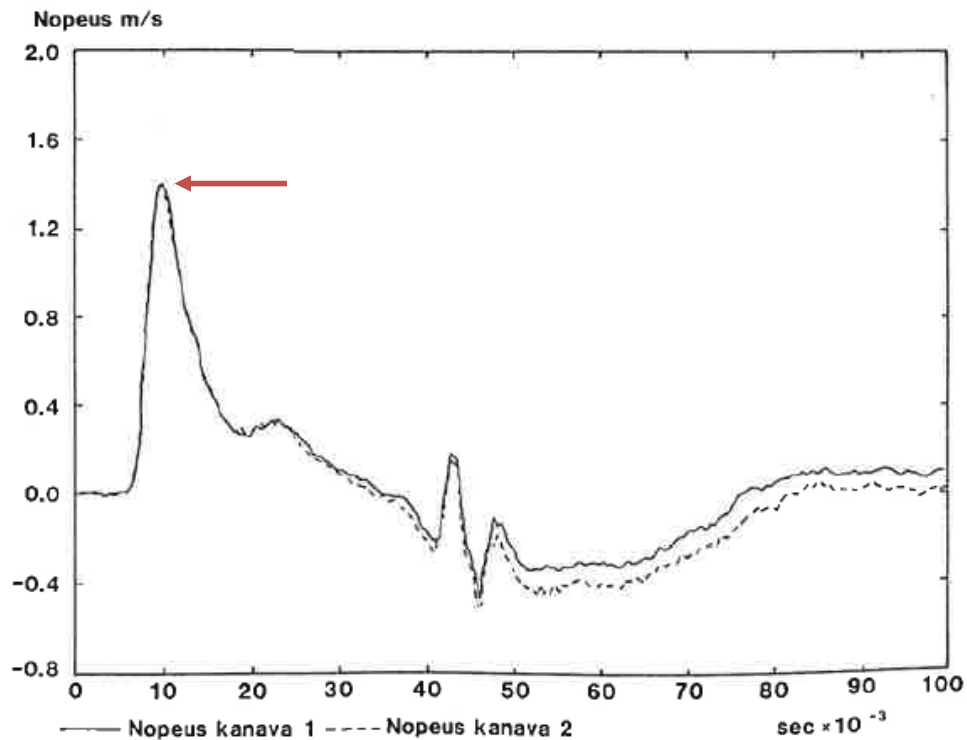
Kuva 3.6 Voimasignaali kuvaaja, kuvaajassa nähdään signaalien hyvä yhteensopivuus. (Kuva: Seppälä. 1993.)

Signaalien yhteensopivuutta häiritsee lyönnin epäkeskeisyys, voima-antureiden väärä sijainti, hiushalkeama voima-anturin kohdalla, jatkos lähellä antureita tai antureiden ollessa liian lähellä maanpintaa (Liikennevirasto. 2016).



Kuva 3.7 Voimasignaalkuvaaja, kuvaajassa nähdään signaalien huono yhteensopivuus. (Kuva: Seppälä. 1993.)

Nopeussignaalkuvaajien avulla voidaan myös tehdä johtopäätöksiä signaalien yhteensopivuudesta. Alkunopeuden maksimiarvo ja arvio lyöntivastuksesta voidaan päätellä keskiarvokuvaajasta, katso kuva 3.8.

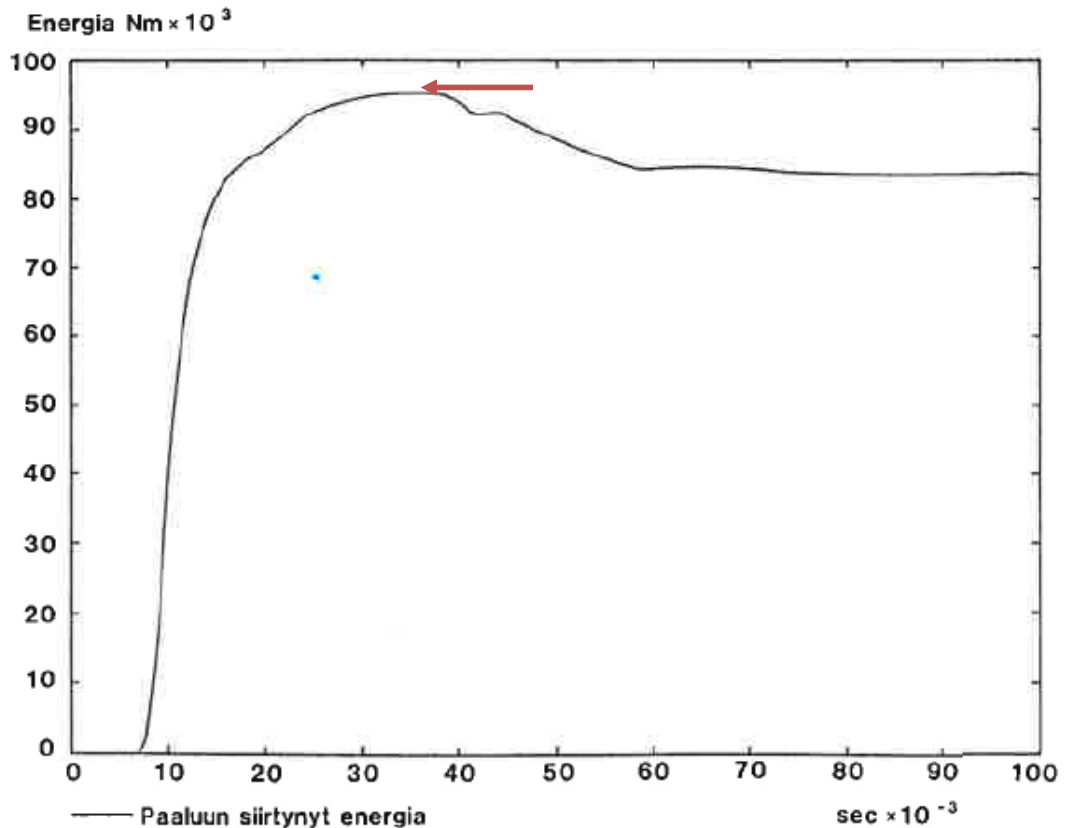


Kuva 3.8. Esimerkki nopeussignaalkuvaajasta, voidaan lukea alkunopeuden maksimiarvo. (Kuva: Seppälä. 1993.)

Paaluun siirtyneen energian kuvaajasta saadaan selville siirtyneen energian maksimi-arvo. Kun tiedetään energian arvo, voidaan laskea lyöntikaluston tehokkuus, kun järkäleen paino W ja pudotuskorkeus h ovat tiedossa. Esimerkkinä kuva 3.9.

Kaluston tehokkuus voidaan laskea seuraavasti (Seppälä. 1993.):

$$\eta = \frac{\text{siirtynyt lyöntienergia}}{\text{lyöntienergia}} = \frac{\int_0^t F(t)v(t)dt}{hW} \quad (35)$$

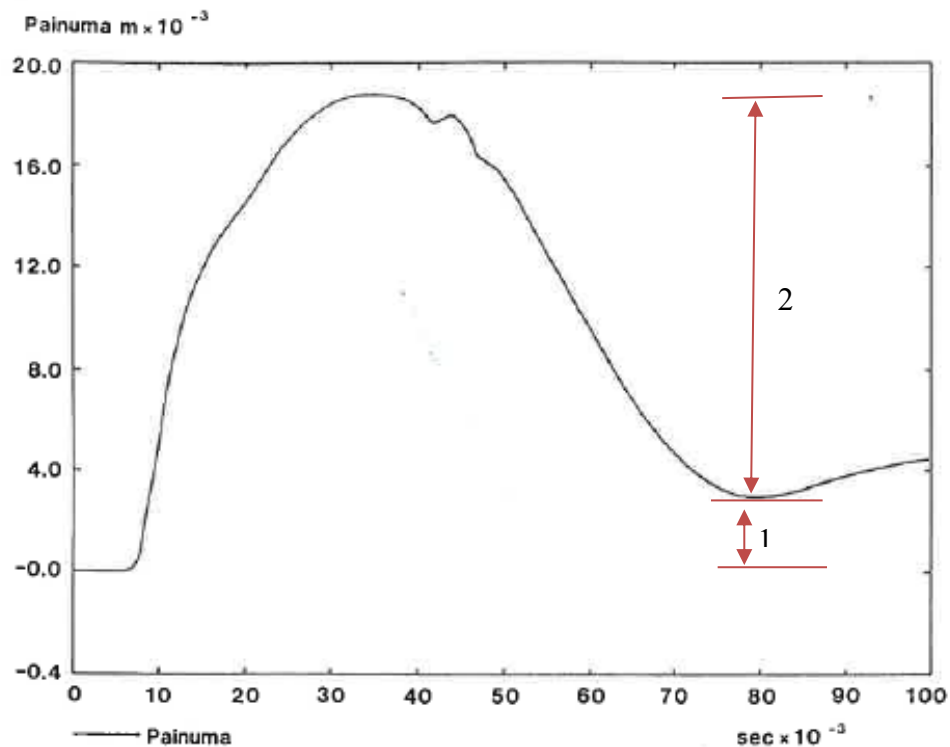


Kuva 3.9 Paaluun siirtyneen energian kuvaaja, kuvaajasta saadaan energian maksimi-arvo, jonka perusteella voidaan laskea lyöntikaluston tehokkuus. (Seppälä. 1993.)

Paalun yläpäähän saadaan siirtymä ajan funktiona siirtymäkuvaajasta. Paalun yläpäähän siirtymä s_{max} on pysyvän painuman s_p ja jouston summa.

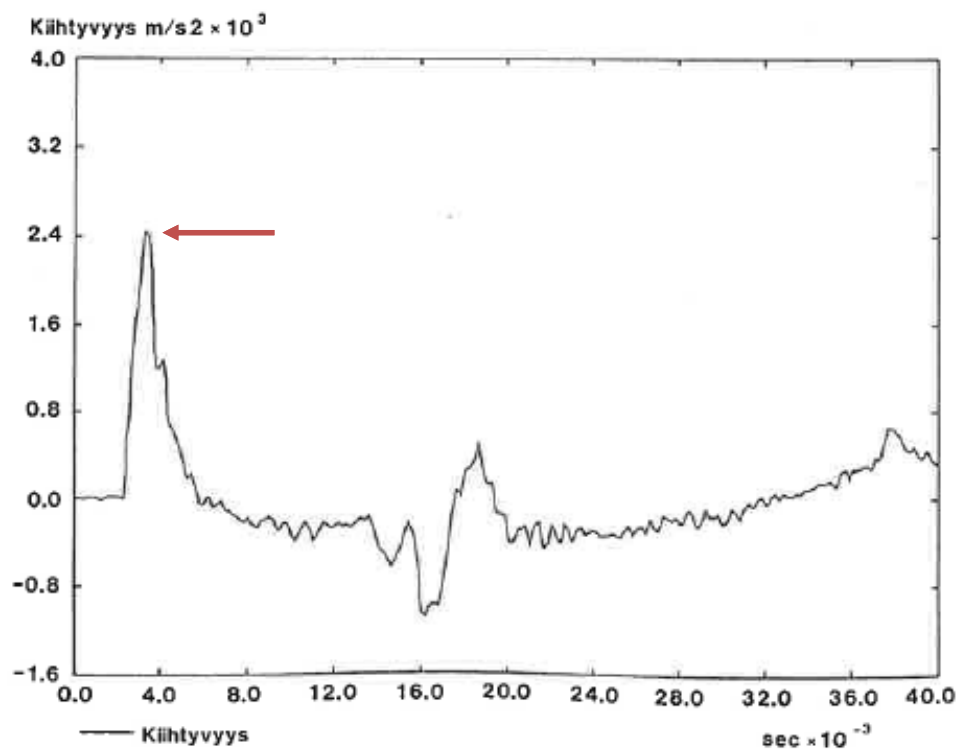
$$s_{max} = s_p + jousto \quad (36)$$

Joustoa esiintyy eteenkin, kun paalu lyödään tiiviiseen, runsaasti hienoja maalajeja sisältävään moreeniin. Jousto voimistuu monesti paalutuksen edetessä, sillä huokosveden paine kasvaa kärjen alla. Kun huokospaine laskee, jousto kärjen alla pienenee taas. Jousto vaikuttaa paalutukseen siten, että lyöntienergiasta suuri osa menee joustoon, ja täten energiaa ei ole tarpeeksi paalun upottamiseen, joka taas johtaa paalun ”pomppimiseen”. Näissä tapauksissa lopetuslyönnit eivät anna oikeanlaista kuvaa paalun kantavuudesta. (Liikennevirasto. 2016.) Kuvassa 3.10 on esitetty siirtymäkuvaaja.



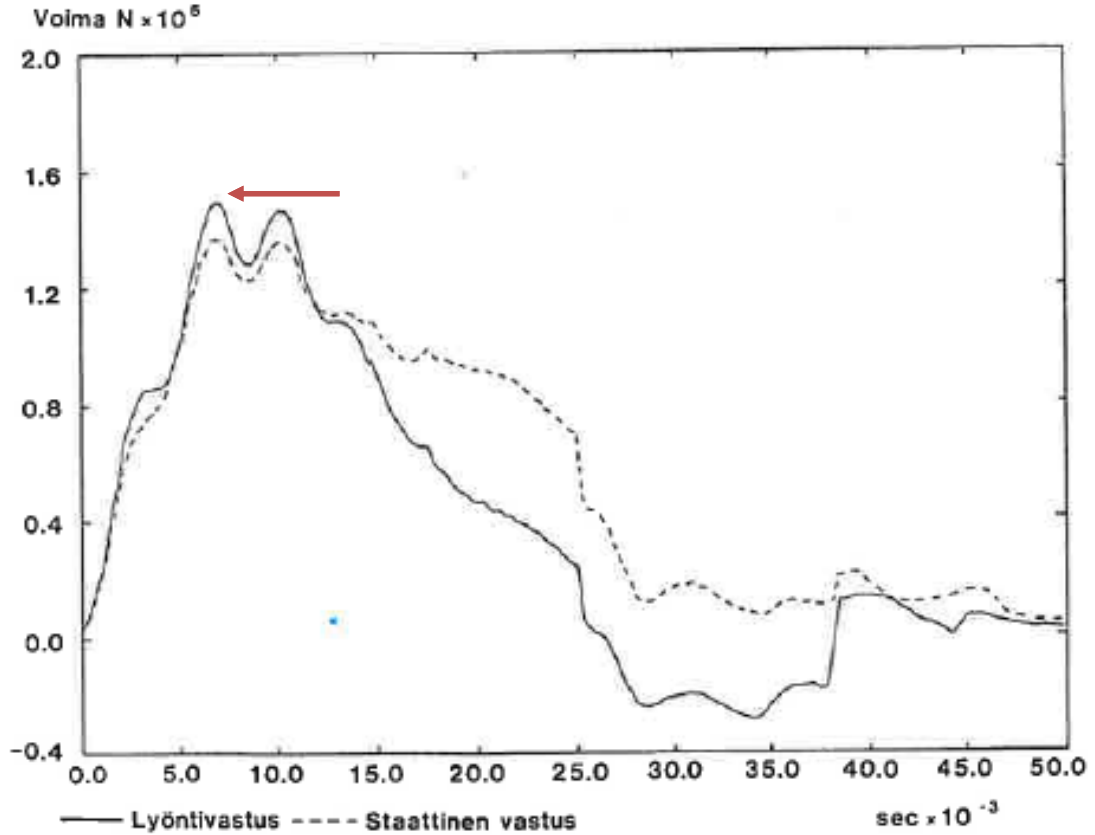
Kuva 3.10 Esimerkki siirtymäkuvaajasta, josta näkee paalun maksimisiirtymän. Maksimisiirtymä koostuu pysyvästä painumasta (1) ja joustosta (2). (Kuva: Seppälä. 1993.)

Kiihtyvyysskuvaajasta, kuva 3.11, saadaan kiihtyvyyden maksimiarvon ajanhetki.



Kuva 3.11 Esimerkki kiihtyvyysskuvaajasta, josta voidaan lukea kiihtyvyyden maksimiarvon ajanhetki. (Kuva: Seppälä. 1993.)

Lyöntivastuskuvaajasta saadaan selville kokonaislyöntivastus ja laskettu staattinen vastus ajan funktiona. Kuvassa 3.12 esimerkki lyöntivastuskuvaajasta.



Kuva 3.12 Esimerkki lyöntivastuskuvaajasta, voidaan lukea suurin mobilisoitu staattinen vastus paalulle. (Kuva: Seppälä. 1993.)

Tiedot, joita useimmiten haetaan PDA-mittauksella, eli kantavuus, saadaan voima- ja partikkelinopeuskäyrien sekä ylös- ja alaspäin kulkevien iskuaaltojen käyrien avulla. Tällöin käytetään yhtälöitä:

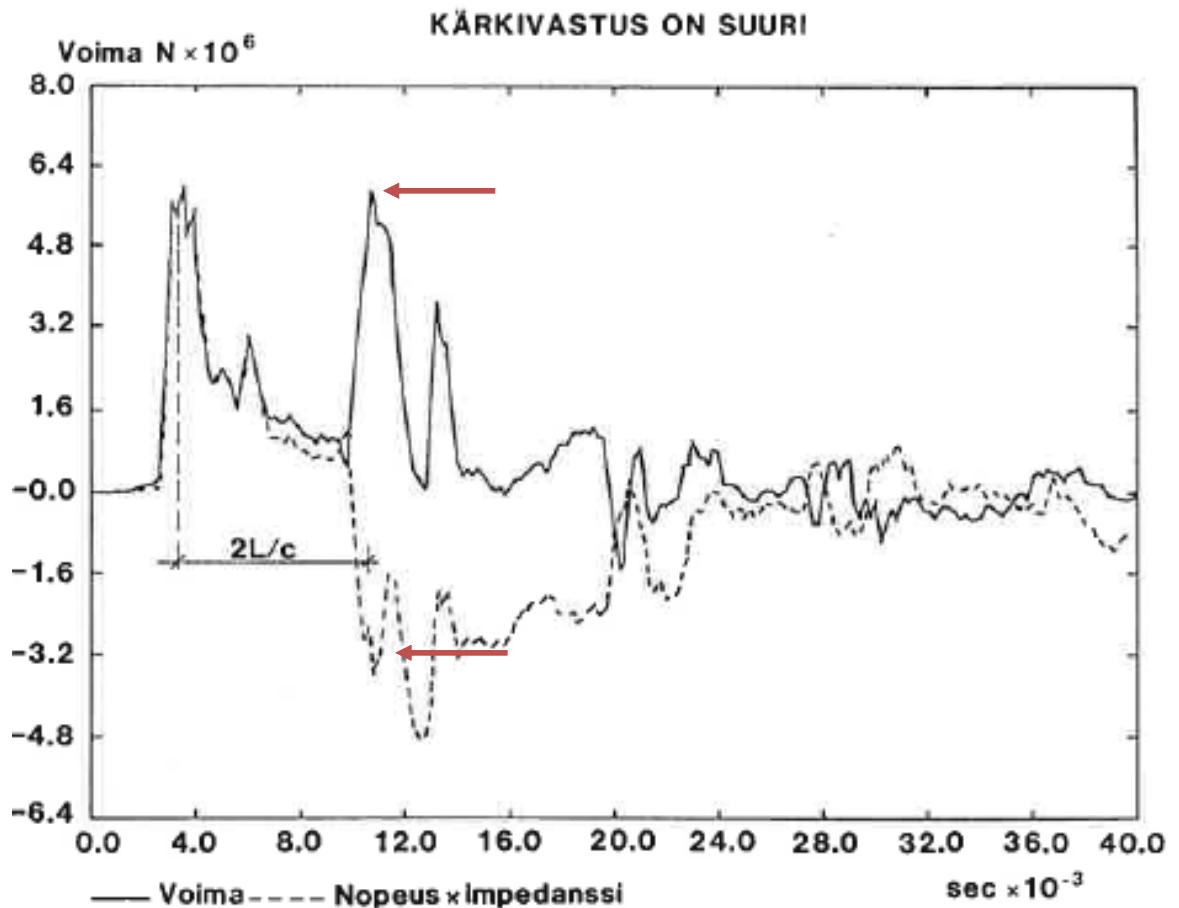
$$F \uparrow (t) = \frac{F(t) - Zv(t)}{2} \quad (37)$$

$$F \downarrow (t) = \frac{F(t) + Zv(t)}{2} \quad (38)$$

Ensimmäisen huipun kohdalla arvo on teoriassa nolla, koska $F(t) = Zv(t)$, kun maan ja paalun vaimennus ei vielä ole vaikuttanut iskuaaltoon. (Seppälä. 1993.)

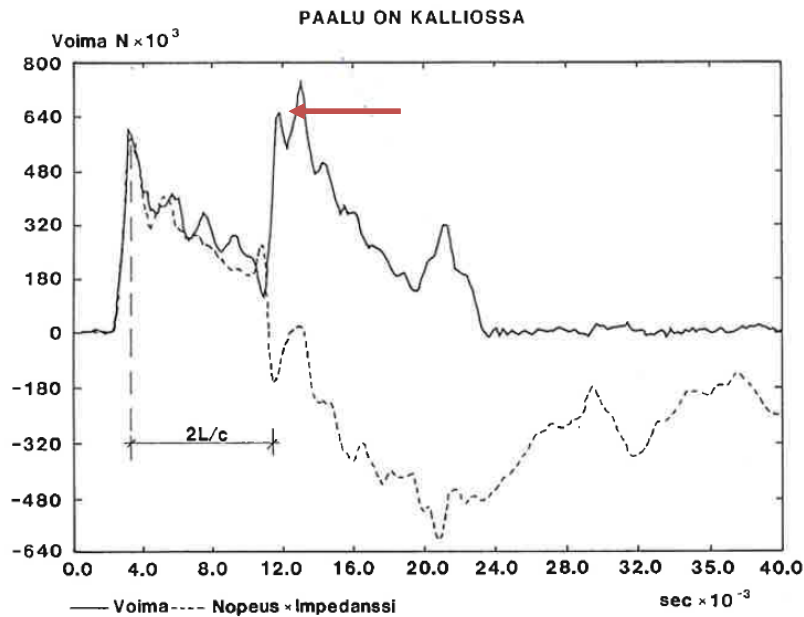
Kuvaajissa vaaka-akselilla on aika millisekunneissa ja pystyakselilla esitetään joko voima ja nopeus kertaa impedanssi tai pelkästään nopeus. Aika kuvaa iskuaallon etenemistä paalussa, ja hetkellä $t = 2L/c$ iskuaalto on edennyt antureista paalun kärkeen ja takaisin. Käytännössä paalun kärki voidaan siis havaita ajanhetkellä $t_0 + 2L/c$. L on etäisyys antureista kärkeen. Iskuaallonnopeus c on suuruusluokkaa $c^2 = E/\rho$ ja se riippuu paalumateriaalista, teräspaaluille iskuaallonnopeus on 5122 m/s ja teräsbetonipaaluille luokkaa 3200-4500 m/s. (Liikennevirasto. 2016.) Teräspaaluja on siinä mielessä helpompi mitata, että niissä materiaali on homogeenista ja iskuaallonnopeus ei muutu. Teräsbetonipaalussa aallonnopeus voi olla eri alapaalussa ja yläpaalussa, joka tuo hieman lisää vaativuutta mittaukseen.

Karkeammissa maalajeissa kuten hiekassa ja moreenissa paaluun kohdistuu suurempi kärkivastus kuin pehmeissä maalajeissa. Kun paaluun kohdistuu suuri kärkivahvistus, ajan $t=2L/c$ jälkeen voima saa suuria positiivisia arvoja ja nopeus kertaan impedanssi taas pieniä, katso kuva 3.13. Paalu painuu ainoastaan vähän, ja jännitys on puristusjännitystä. Tällöin paalulla on suuri kantavuus.



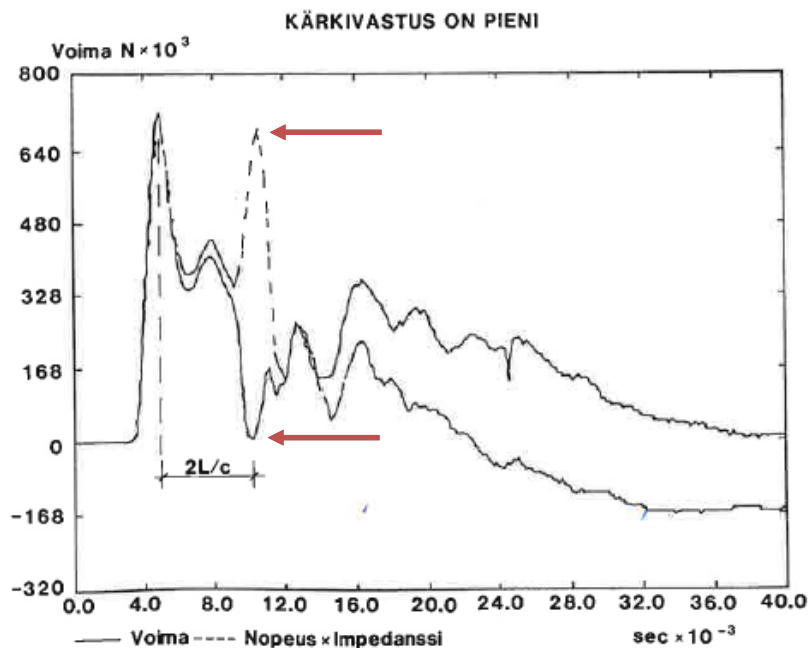
Kuva 3.13 Voima-nopeus \times impedanssikäyrällä on nähtävissä suuri kärkivastus, voima saa suuren positiivisen arvon ja nopeus kertaan impedanssi pienen. (Kuva: Seppälä. 1993.)

Mikäli paalun kärki on yhteydessä kallionpintaan, saadaan erittäin voimakas kärkiheijastus mittauksessa, voima on lähellä tulosta $F = 2F_0$, jossa F_0 on alkuiskuaallon aiheuttama voima. Katso kuva 3.14. Paalun pysähtyessä muuhun maakerrokseen, voima on kokoluokkaa $F = 1,5-1,8 F_0$. (Seppälä. 1993.) Lyhyissä paaluissa voima voi olla jopa 2,3-2,5-kertaisia, sillä iskuaalto ehtii heijastua järkäleen kautta uudestaan ja summautuu täten (Jääskeläinen. 2009).



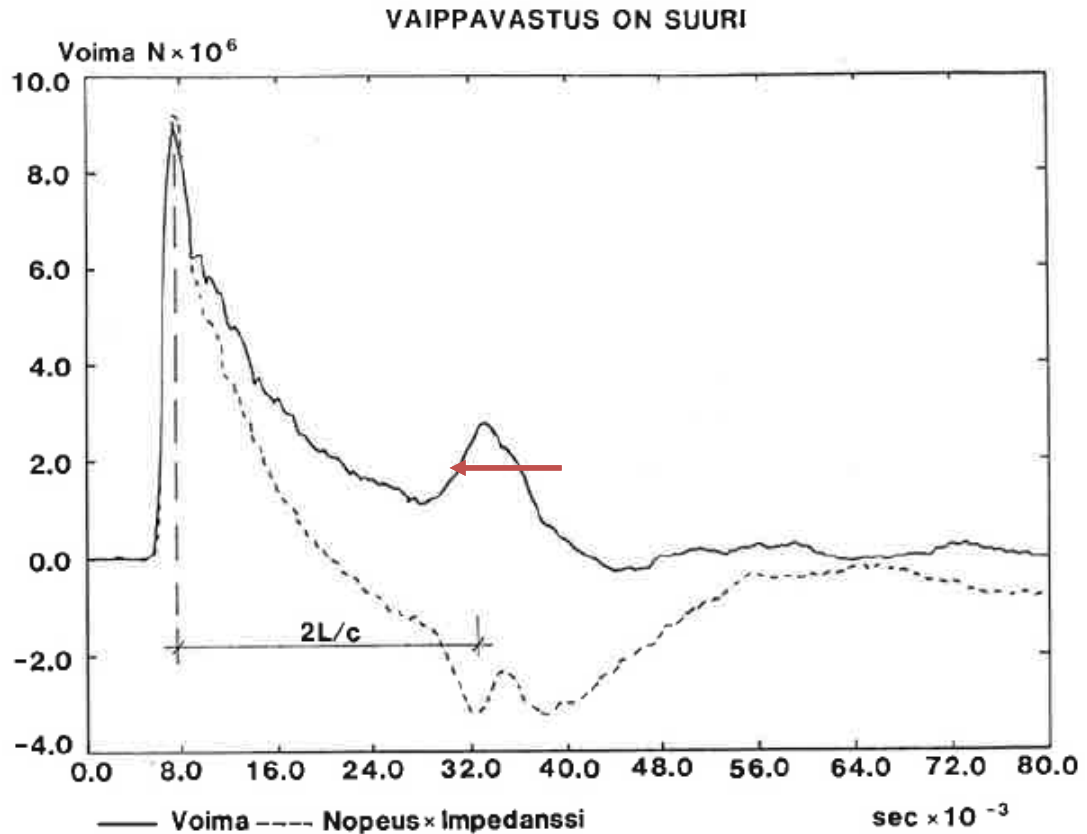
Kuva 3.14 Paalu on yhteydessä kallionpintaan, voima-nopeus \times impedanssikäyrän tulos, voidaan nähdä erittäin voimakas kärkiheijastus. (Kuva: Seppälä. 1993.)

Kun paalussa on pieni kärkivastus, nopeus kertaa impedanssi saa suuria arvoja ja voima pieniä arvoja ajankohdan $t = 2L/c$ jälkeen. Tällöin painuma on suuri ja paaluun syntyy vetojännitystä. Katso kuva 3.15. Vetojännitykset ovat haitallisia teräsbetonipaaluille, ja ne voivat katkaista sen. Kun taas painumat pienenevät, kasvaa jännitys paalun pohjassa lähes kaksinkertaiseksi yläpään maksimijännityksestä. Tämä voi johtaa alapään rikkoutumiseen, ilman, että maanpinnalla on nähtävissä mitään vaurioita. Paalutusohje edellyttää tämän takia, että paalu painetaan vasaralla pehmeässä savessa, ja lyönnit aloitetaan vasta maaperän tiukentuessa. Paalun katkeamisen voi huomata siitä, että paalu uppoaa yhtäkkiä nopeammin, ennen kuin taas pysähtyy. (Jääskeläinen. 2009.)



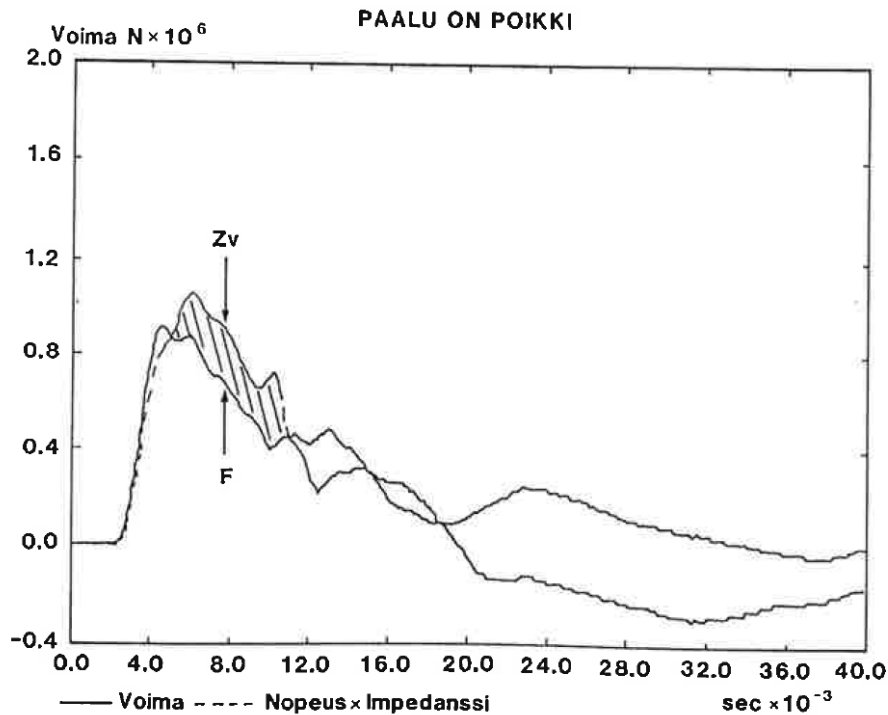
Kuva 3.15 Vetojännityksen voi huomata kuvaajasta ajankohdan $t = 2L/c$ jälkeen, nopeus kertaa impedanssi saa suuria arvoja, kun taas voima pieniä arvoja. (Kuva: Seppälä. 1993.)

Vaippakitka havaitaan, kun ylöspäin kulkeva iskuaalto saa positiivisia arvoja jo ennen $t=2L/c$, voiman arvot pienenevät vähemmän kuin nopeuden arvot ja voimakäyrä pysyvät nopeuskäyrän yläpuolella. Kärkiheijastus heikkenee myös vaippavastuksen takia. Katso kuva 3.16.



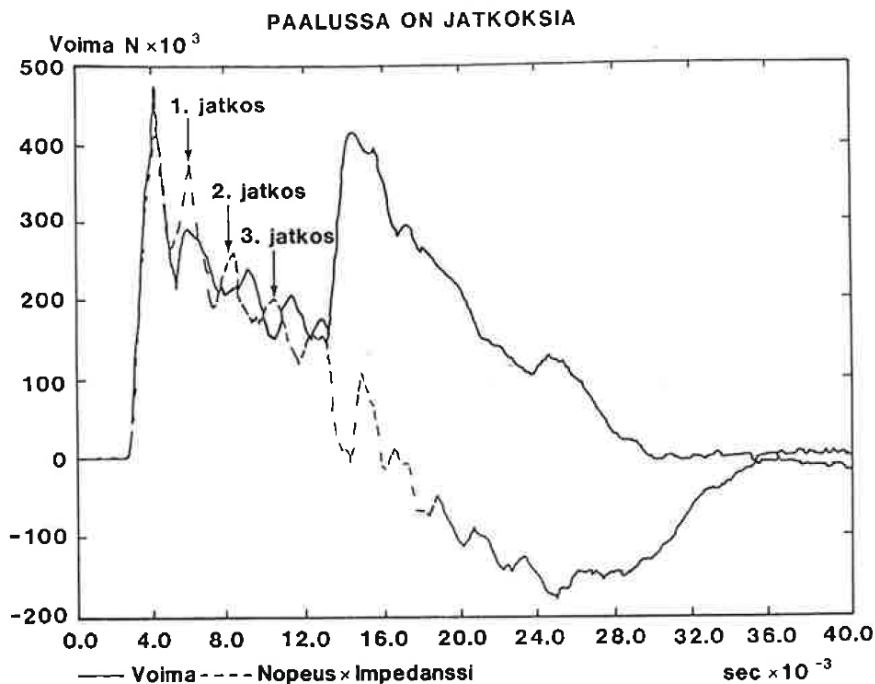
Kuva 3.16 Suuri vaippavastus näkyvissä voima-nopeus \times impedanssikäyrällä, kärkiheijastus on heikennyt ja iskuaalto saa positiivisia arvoja jo ennen $t=2L/c$. (Kuva: Sepälä. 1993.)

Kun taas paalu on vaurioitunut, iskuaalto heijastuu vaurioituneesta kohdasta ylöspäin vetoaaltona. Tällöin samalla tavalla kuin kärkivastuksen ollessa heikko, nopeuskäyrä menee voimakäyrän yläpuolelle, katso kuva 3.17. Kun on kyseessä suuri halkeilu, pysyy Zv-kuvaaja voimakuvaajan yläpuolella koko ajan.

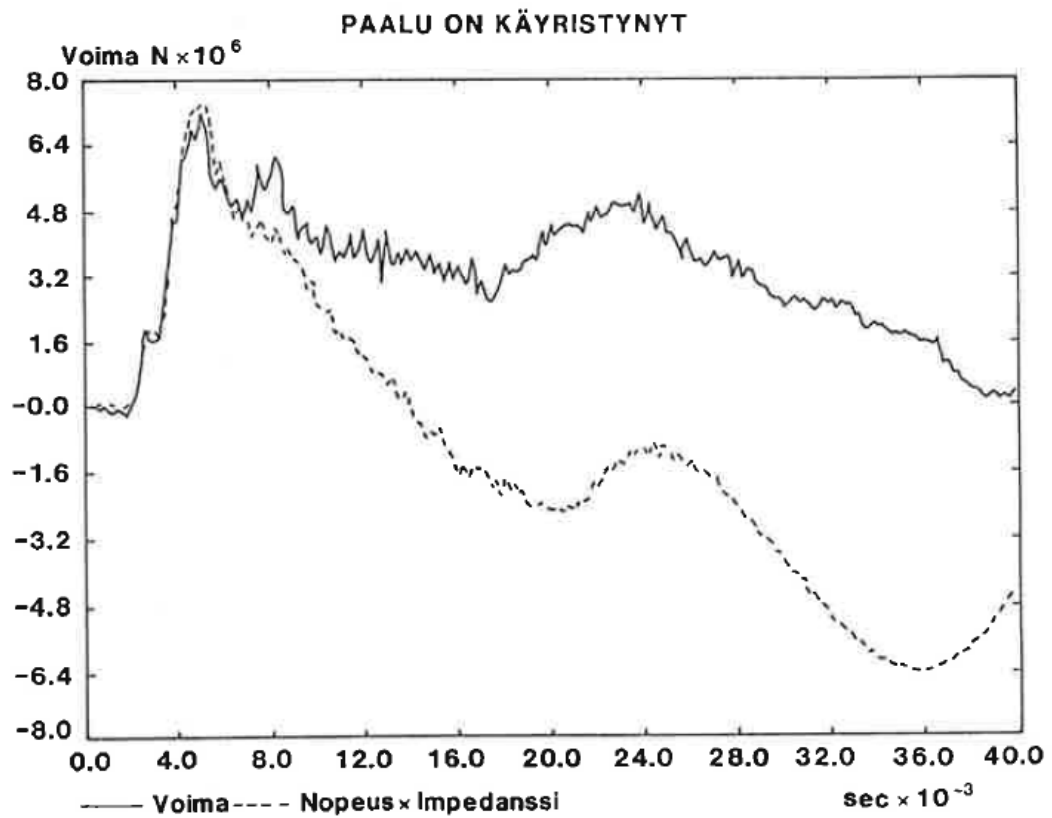


Kuva 3.17 Paalun vaurion näkyminen voima-nopeus \times impedanssikäyrältä, nopeuskäyrä on voimakäyrän yläpuolella koko ajan. (Kuva: Seppälä. 1993)

Paalun jatkokset aiheuttavat myös heikkoja vetoaaltoja, eli jatkoskohta näyttää samalta kuin vaurioitunut kohta, katso kuva 3.18. Ero näiden välillä nähdään siinä, että nopeus kertaan impedanssikäyrä on ainoastaan hetkellisesti voimakäyrän yläpuolella. Myös paalun käyristyminen voidaan havaita, tällöin yhtälö $t = 2L/c$ ei täsmää ja kärkiheijastus on epäselvä, katso kuva 3.19. (Seppälä. 1993.)



Kuva 3.18 Paalun jatkosten näkyminen voima-nopeus \times impedanssikäyrältä, jatkoskohdassa nopeus kertaan impedanssi hetkellisesti voimakäyrän yläpuolella. (Kuva: Seppälä. 1993)



Kuva 3.19 Paalun käyristymisen näkyminen voima-nopeus \times impedanssikäyrältä, kärk-heijastus on epäselvä ja yhtälö $t=2L/c$ ei täsmää. (Kuva: Seppälä. 1993.)

4 Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät

4.1 Tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät

Tässä työssä on käytetty alan julkaisuja ja ohjeita, kuten virallisia paalutusohjeita ja paalutuotelehtiä, Liikenneviraston ohjeita ja eurokoodeja.

Tapaustutkimuksissa käydään läpi neljä eri työmaata, joissa on hyödynnetty PDA-mittauksista loppulyöntiehtojen tarkentamiseen. Käytettävissä on ollut YIT Rakennus Oy:n paalutuskohteiden tiedot, ja niistä on valittu neljiä mahdollisimman kuvailevaa esimerkkiä. PDA-mittaukset ovat jo suhteellisen tavallisia, joten tuloksia, joista valita löytyi paljon. On tosin huomioitava, että monessa kohteissa loppulyöntiehtoja ei säädetä, vaan todetaan paalutuotelehden määräämät loppulyöntiehdot sopiviksi.

YIT Rakennus Oy:llä on käytössä etäluettava PDA-mittauslaitteisto, joka tekee mittauksesta vaivattomampaa, eikä mittajaan tarvitse olla työmaalla mittauksen aikana. Työssä selitetään, miten mittaus suoritetaan, ja miten etäluettavaa laitteistoa käyttäessä mittaus eroaa perinteisestä mittauksesta, kun iskuaaltomittauksen tekijän ei tarvitse olla paikan päällä.

Tätä työtä varten on haastateltu Inspectan teknisiä asiantuntijoita, DI Teemu Riihimäkeä sekä DI Teemu Repoa. Riihimäki ja Repo ovat kertoneet PDA-mittauksen kulusta toimistossa sekä työmaalla, ja pohtineet mittauksen käyttöä työssä tutkittaviin tarkoituksiin. Haastattelussa asiantuntijamielipiteitä on myös antanut YIT:n pohja- ja erikoisrakentamisen tekninen johtaja DI Tommi Hakanen, jolla on taustaa paalutuksesta sekä PDA-mittauksien teosta.

4.2 PDA-mittauksen suoritus

Mikäli mitattavat paalut ovat koepaaluja, niiden määrä määrittyy pohjaolosuhteiden ja niiden vaihteluiden perusteella, rakenteen geoteknisen luokan perusteella, aikaisempien dokumentoitujen kokemusten perustella sekä paalutyypin ja paalujen kokonaismäärän perusteella. Mikäli kyseessä on varsinaiset perustuspaalut koekuormitusten määrä ja paalut tulee valita paalutustyön aikana tehtyjen havaintojen perusteella. Koekuormituksessa lyöntivasaran aiheuttaman kuorman on vastattava vähintään perustuksen mitoituskuormaa, eli lyöntienergian on oltava riittävän korkea. Paalun koekuormitus on tehtävä paaluille, jotka sijaitsevat mahdollisimman erilaisilla paikoilla, yksi paalu tulee aina vähintään koekuormittaa epäedullisimpien pohjaolosuhteiden kohdalla. Koekuormitus tulee suorittaa riittävä aika asennuksen jälkeen, jotta paalumateriaali on saavuttanut lujuutensa ja huokosvesipaine on palautunut alkuperäiseen arvoonsa. (RIL 207-2017).

Taulukossa 4.1 esitetty lujuuden palautumiseen tarvittavat ajat eri maalajeille. Paalut hiekkamaaperässä ovat osoittaneet huomattavaa pituussuuntaista vaipan kapasiteetin kasvua kuukausina asennuksen jälkeen (Jardine, R. J. et al. 2006). Keskusteltaessa Repon ja Riihimäen kanssa, milloin mittaukset kannattaa tehdä, todettiin, että jo yhden vuorokauden jälkeen saadaan hyviä tuloksia. Mikäli huokosvedenpaine on noussut, se laskee yleensä vuorokauden kuluessa. Tukipaalukohteissa ei yleisesti ole niin suurta merkitystä, kuinka kauan paalut ovat maassa ennen mittauksia, mutta kitkapaaluissa kantavuus paranee koko ajan. Myös silttisessä moreenissa on havaittu, että kantavuus ei välttämättä heti

ole niin hyvä, vaan kannattaa odottaa ainakin vuorokauden verran. (Repo, Riihimäki. 2018.)

Ennen mittauksen aloitusta paalut lyödään tavoitetasoon, jotta voidaan olettaa niiden saavuttaneen vaadittu murtokuorma. Paalut voidaan myös jättää hieman tavoitetason yläpuolelle, mikäli halutaan testata, saavutetaanko tarvittava murtokuorma jo ennen tavoitetasoa. On suotavaa, että itse mittaus tehdään samalla kalustolla kuin varsinaiset paalujen asennukset. (Seppälä. 1993.) Mikäli paalutuotelehti antaa loppulyöntiehdoksi esimerkiksi 20 millimetriä kymmenelle iskulle, kannattaa kokeilla jättää paaluja huomattavasti kevyempääkin, jopa 30 tai 40 millimetriin. Tämä onnistuu kohteissa, jossa on tiukka maaperä pidemmän matkan ajan. Mikäli kohteessa on savikerros, jonka jälkeen paalu pysähtyy nopeasti, tällaista kokeilua tuskin pystyy tekemään. (Repo, Riihimäki. 2018.)

Taulukko 4.1 Maan alkuperäisen lujuuden palautumiseen tarvittavan ajan riippuvuus paalua ympäröivästä maalajista. (Seppälä. 1993.)

Paaluja ympäröivä maalaji	Aika
Savinen siltti Siltti	2 - 3 kk
Hiekkainen siltti Silttinen hiekka	noin 1 kk
Hiekka (hienoinesta alle 15%)	2 - 14 vrk
Moreeni (HkMr - SiMr, riippuen raekokojakaumasta)	2 vrk - 3 kk

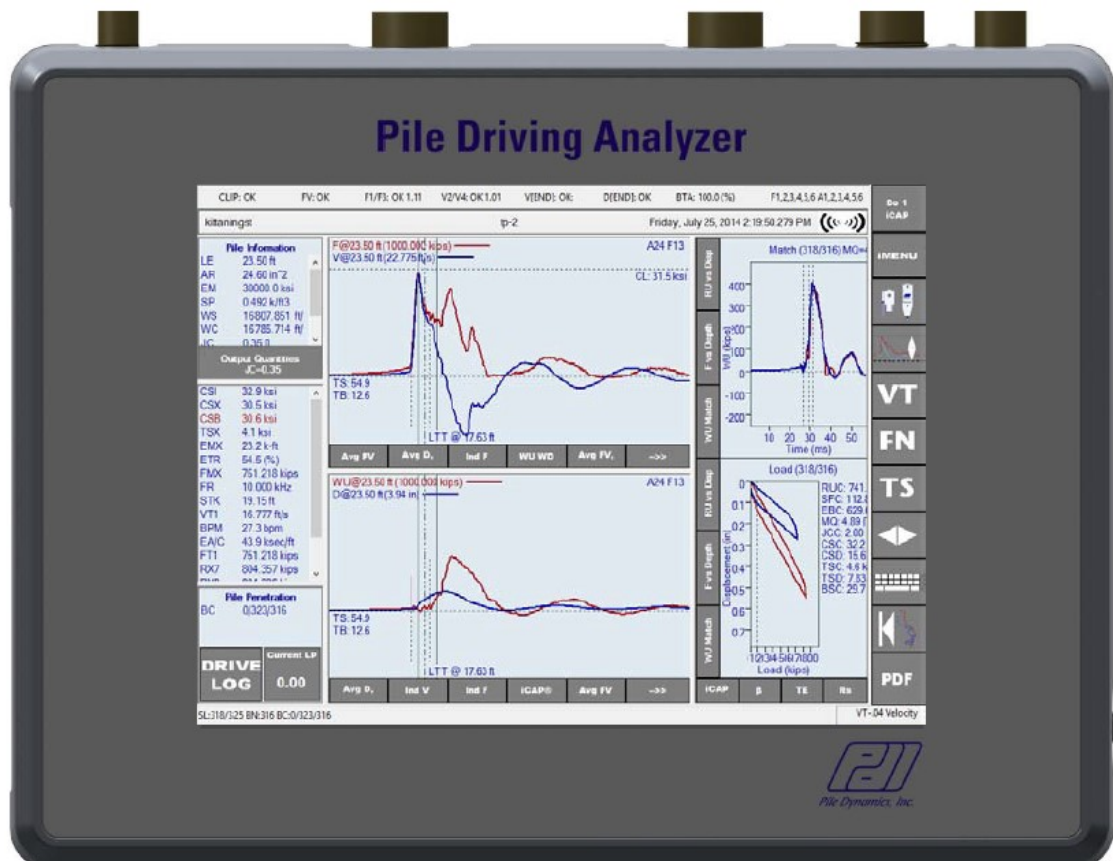
Etämittauksen hyöty on, että mittaajan ei tarvitse olla työmaalla mittauksen aikana. Tässä diplomityössä käytetyissä kokeissa mittaaja on ollut Inspecta Oy. Urakoitsija, tässä työssä YIT Rakennus Oy, asentaa anturit työmaalla ja Inspecta Oy suorittaa varsinaisen mittauksen etäyhteyden avulla. Tässä osiossa selitetään sanallisesti ja kuvien avulla PDA-mittauksen kulku. Kuvat on otettu Hyvinkäällä Astreankadun työmaalla, kyseinen kohde esitellään myös tapaustutkimuksessa.

Ennen kun mittausta voi aloittaa, on lähetettävä mittaavalle osapuolelle, tässä työssä Inspectalle, lähtötiedot kohteesta. Tästä eteenpäin puhutaan mittaavasta osapuolesta Inspectana. Inspectalle tulee lähettää seuraavat tiedot:

- työmaan tiedot
 - paalukuorma ja prosenttiosuus/kappalemäärä paaluja
 - tai vaihtoehtoisesti vaadittu PDA keskiarvo ja PDA minimiarvo
- paalujen tiedot
 - paalunumerot
 - paalutyypit ja paalun poikkileikkaus
 - paalujen pituudet
 - paalun kärkityyppi
 - antureiden etäisyys yläpäähän ja maahan
 - paalujen asennuspäivämäärät
 - toteutuneet loppulyönnit
 - pudotuskorkeus ja pudotusenergia
 - asennus- ja kuormituskaluston tiedot

Lisäksi on hyvä kertoa työmaan pohjaolosuhteista ja miten paalu on käyttäytynyt lyötäessä.

Kokeet, joita analysoidaan tässä diplomityössä, on tehty laitteella Pile Driving Analyzer®-Model 8G. Laitteen on valmistanut Pile Dynamics, Inc. Laitteistossa on käytössä ”TeamViewer” -ohjelmisto, jonka avulla mittaja voi ottaa etäyhteyden laitteeseen, eikä täten tarvitse olla paikalla mittauksen aikana. Kuvassa 4.1 on esitetty käytetty PDA-tietokone.

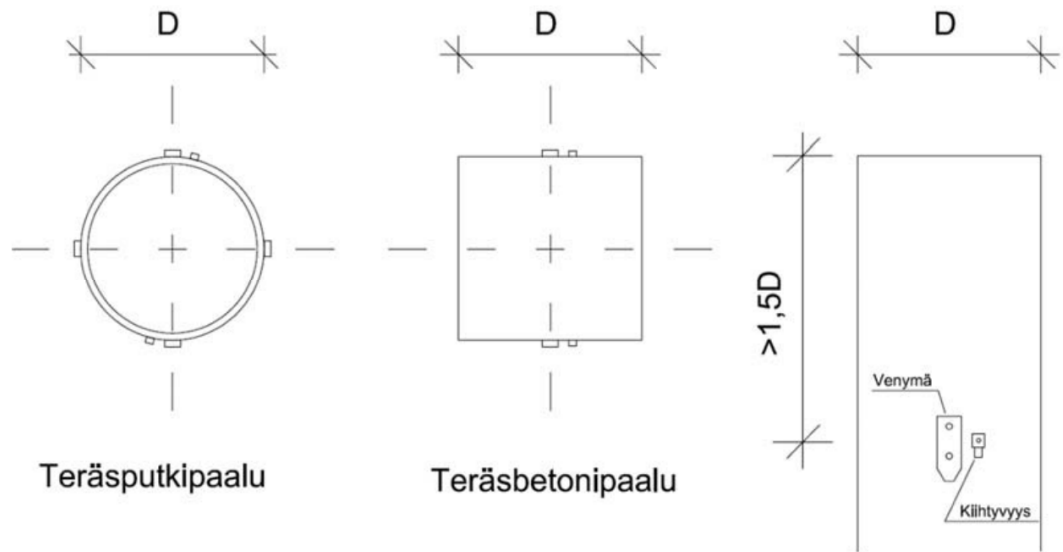


Kuva 4.1 Pile Driving Analyzer®-Model 8G. (Kuva: Pile Dynamics, Inc)

Etä-PDA-mittauksen suurin kustannus on itse laitteisto. Laitteiston voi joko vuokrata tai ostaa. Tämän lisäksi täytyy hankkia puristin, joka asetetaan paaluun reikien porauksen helpottamiseksi. Kertakäyttöisiä kiila-ankkureita menee kaksi jokaista venymäänturia kohti ja yksi jokaista kiihtyvyyssanturia kohti. Tämän lisäksi urakoitsijalla tulee olla tavanomaisia työkaluja, kuten esimerkiksi porakone ja vasara.

PDA-mittauksen valmistus aloitetaan poraamalla reiät paaluihin antureita varten. Anturit on hyvä sijoittaa niin, että paalun yläpäähän on noin metri, vähintään 1,5 kertaa paalun sivumitan, eli esimerkiksi TB300b paalun tapauksessa 45 senttimetriä antureista. Riippuen lyöntijärkälästä voi olla, ettei 45 senttimetriä riitä, sillä joidenkin lyöntivasaroiden ohjurit voivat yltää jopa lähes metrin paalun yläpään yli. Antureista alapäähän olisi myös hyvä olla metri, vähintään 50 senttimetriä. Eteenkin jos paalu painuu koekuormituksen yhteydessä, on tärkeää, että etäisyyttä antureista on maahan, sillä anturit eivät saa olla kontaktissa maahan, tai ne voivat rikkoutua. On siis tärkeää, että koekuormitettavissa paaluissa on tarpeeksi kantoa, eli ylimääräistä paalua, jotta mittaukseen tarvittavat etäisyydet maanpintaan ja lyöntivasaraan täyttyvät. Mikäli mitattava paalu on liian lyhyt, anturit

voidaan asentaa apupaaluun. Kuvassa 4.2 on esitetty periaatekuva venymä- ja kiihtyvyyssanturien asennuspaikoista paaluissa.



Kuva 4.2 Venymä- ja kiihtyvyyssanturien asennuspaikat paaluissa. (Lähde: Liikennevirasto. 2016.)

Paaluun kiinniteetään ns. puristin, jossa on reiät porakoneen poraa varten, sen tehtävänä on saada reiät suoraan ja tarkoilta etäisyyksille toisistaan. Reiät ovat antureita varten. Kuvissa 4.3a ja 4.3b on esitetty puristin ja reikien poraus. Paaluihin porataan reiät tavantomaisella porakoneella.



Kuva 4.3a Puristin on asennettu paaluun Kuva 4.3b Reiät porataan porakoneella, helpottamaan reikien porausta tarkasti.

Kun anturit on asennettu, paaluun kohdistetaan pieniä kokeiluiskuja, joilla varmistetaan, että isku osuu keskeisesti paalun yläpäähän. Mikäli isku ei ole keskeinen, paalutuskoneen keiliä käännetään, jotta saadaan keskeinen lyönti.

Porattuihin reikiin asennetaan kiila-ankkurit, jotka lyödään tiukasti paaluun. Ne eivät kuitenkaan saa mennä kokonaisuudessaan paalun sisään, tällöin antureiden kiinnitys ei onnistu oikealla tavalla. Tämän takia on porattava reiät tarkasti, ettei niistä tule liian syvät. Liian lyhyet reiät on porattava syvemmälle, sillä kiila-ankkuri ei saa jäädä paalun ulkopuolelle. Kuvissa 4.4a ja 4.4b on esitetty lyöntiankkurit ja niiden lyönti paalun sisään.



Kuva 4.4a Kiila-ankkurit laitettu porattuihin reikiin.



Kuva 4.4b Ankkurit lyödään tiukasti sisään paaluun.

Etämittausta tehdessä nämä työvaiheet kannattaa tehdä ennen kuin aloittaa itse mittauksen ja anturien asennuksen. Täten mittaus kuluu sujuvasti, kun tarvitsee ainoastaan siirtää antureita paalusta toiseen. Kun reiät on porattu ja lyöntiankkurit asennettu mitataan etäisyydet antureista kärkeen ja maahan 10 senttimetrin tarkkuudella, ja kirjataan ne taulukoon, joka lähetetään mittaavalle taholle.

Kun tiedot on lähetetty mittaavalle taholle, on aika asentaa anturit ensimmäisenä koe-kuormitettavaan paaluun. Antureissa on lyöntiankkureihin sopivat pultit. Pultteja tulee kiristää tarpeeksi, jotta ne eivät liiku koe-kuormituksen aikana. Mittaustulokset ovat virheellisiä, mikäli anturit pääsevät liustamaan. On kuitenkin huomioitavaa, että venymäanturin liikkuu pystysuunnassa, joten pultit tulee olla hiottu sopiviksi joustamaan tähän tarkoitukseen. Antureihin on hyvä merkitä antureiden numerot, tämä helpottaa järjälleen asettelua oikeaan asentoon, mikäli mittauksissa huomataan epäkeskeisyyttä. Kuvassa 4.5 on asennettu anturit paaluun.



Kuva 4.5 Vasemmalla venymäanturi ja oikealla kiihtyvyysanturi.

Kun anturit on kiinnitetty paalun, tehdään laitteiston tarvittavat säädöt, kuten tasapainotetaan venymä- ja kiihtyvyysanturit sopivalle vahvistukselle. Ohjelma antaa suositukset kohteelle valittavalle vahvistukselle. Vahvistukseen vaikuttaa anturien kalibrointikertoimet, paalumateriaali sekä lyöntikalusto. Tämän jälkeen valitaan antureiden rekisteröintiherkkyys, ns. triggaustaso. Sopiva taso löytyy kokeilemalla. Mikäli triggaustaso on liian matala, anturi saattaa rekisteröidä tärinän signaaliksi, eli tulee valita mahdollisimman korkea triggaustaso, kunhan isku rekisteröityy. (Seppälä. 1993.)

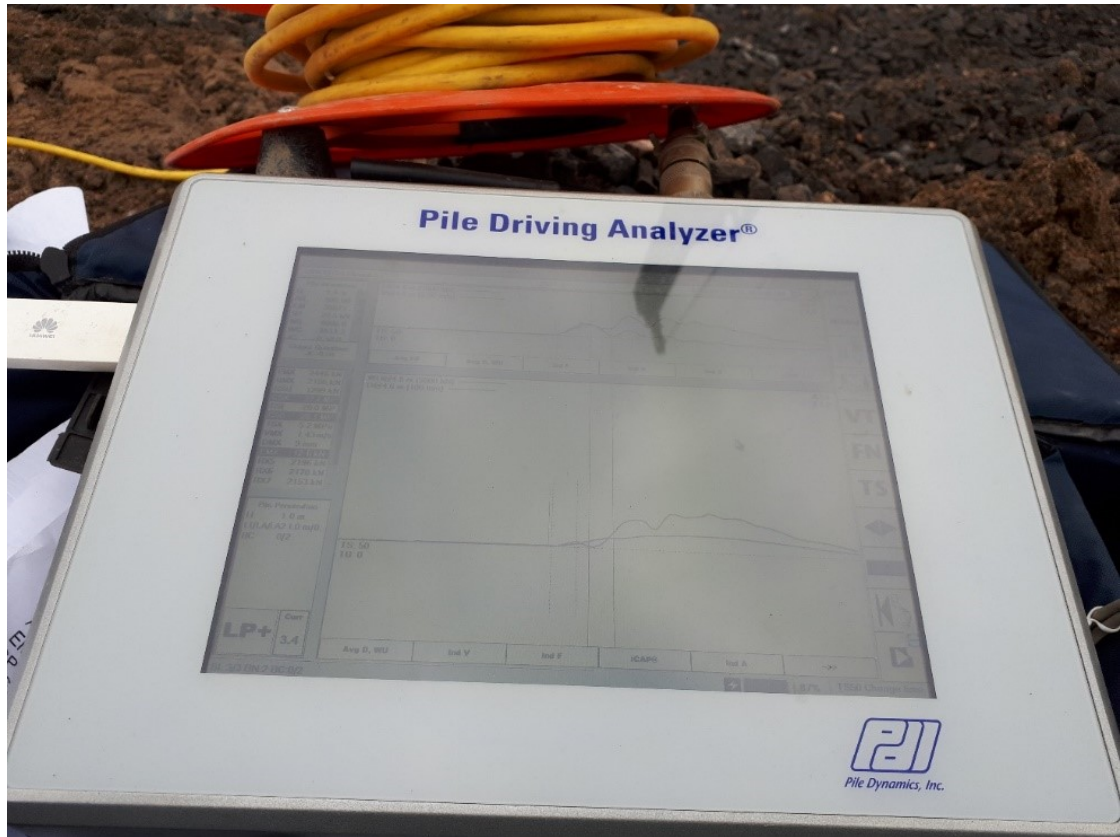
Etämittauksessa työnjohtaja on yhteydessä mittaavaan tahoon, ja toimittaa ohjeita paalutuskoneen kuljettajalle. Kuvassa 4.6 on esitettyä koekuormitustilanne; apumies tarkistaa lyöntivasaran asennon ja näyttää tarvittaessa korjausliikkeet paalutuskoneen kuljettajalle. Taustalla työnjohtajalla on puheyhteys mittaajalle, ja maassa on PDA-tietokone, jota työnjohtaja voi seurata ja jota mittaaja etäohjaa, kuvassa 4.7 on PDA-tietokone. Työnjohtaja välittää kuljettajalle tiedot ja neuvoo lyöntikorkeudessa ja iskun keskeisyydessä.



Kuva 4.6 Koekuormitustilanne.

Mittaja syöttää PDA-tietokoneeseen seuraavat tiedot (Seppälä. 1993.):

- kantavuuden laskentatapa
- signaalin syöttö, tyypit, keräys ja triggaus
- kiihtyvyys- ja venymäanturien vahvistuskertoimet
- paalu- ja maaperätiedot (vaimennuskerroin)
- signaalien prosessointi ja tallennus
- työkohdetiedot



Kuva 4.7 PDA-tietokone työmaalla.

Koekuormitus aloitetaan pienillä lyönneillä, ja lyöntikorkeutta kasvatetaan, samalla seuraten paalussa esiintyviä jännityksiä. Jännitysten ollessa korkeita pudotuskorkeutta ei saa nostaa, koska tällöin on paalun vaurion riski. Koekuormitus lopetetaan, kun riittävä geotekninen kestävyys on mobilisoitu tai saavutetaan paalun sallittu maksimijännitys. Taulukossa 4.2 esitetty laskentakaava paalujen sallituille lyöntijännityksille. Hiushalkeamia voi syntyä, mikäli paalulla on paljon kantoa, ja lyöntienergia on suuri. Mikäli paalussa antureiden kohdalla ilmenee hiushalkeamia, on antureille porattava uudet reiät ja siirrettävä, sillä tulos ei enää ole luotettava. (Repo, Riihimäki. 2018.)

Taulukko 4.2. Paalujen sallitut lyöntijännitykset (EN 12699)

Paalumateriaali	Suurin sallittu lyöntijännitys	Suurin sallittu lyöntijännitys jännityksiä mitattaessa
Teräsbetoni	$0,8 \times f_{ck}$	$1,1 \times 0,8 \times f_{ck}$

Mikäli koekuormituksessa haetaan optimoituja loppulyöntikriteereitä, on tärkeää kokeilla eri nousukorkeuksia ja etsiä niistä soveltuvin. Mittauksessa haetaan sopivaa nousukor-

keutta ja sen aiheuttamaa painumaa, jotka antavat paalulle kuitenkin tarvittavan geoteknisen kestävyys. Korkeilla pudotuskorkeuksilla saadaan monesti myös korkeat jännitykset paaluun, ja mikäli paaluun jatkuvasti lyödään liian korkealla pudotuskorkeudella, on paalun vaurioituminen mahdollista.

Haastattelussa Inspectan Teemu Repo ja Teemu Riihimäki kertoivat, että mittauksen laatu on hyvää etämittauksella. Mikäli anturit taas ovat huonosti paikallaan, sen näkee signaalista, ja on helppo korjata. Venymäanturi on herkkä, ja jos reiät ovat väärin kohtiin porattu, ja anturi venyy tai puristuu, se voi vaurioitua. Jos mittauksen yhteydessä ilmenee harvinaisempi ongelma esimerkiksi epätavanomaisen signaalin myötä, voi mittaaajan olla vaikea yrittää löytää syy, kun ei itse ole työmaalla. Suurimmassa osassa työmaita tällaisia ongelmia ei kuitenkaan ilmene.

Epävarmuustekijöitä mittaukseen ovat muun muassa paalutuskoneen energia, iskutyynyn kunto sekä sähköiset häiriöt. Olisi hyvä käyttää samaa paalutuskonetta PDA-mittauksen yhteydessä, jota on käytetty paalujen asentamisessa. Paalutuskoneen energia vaihtelee riippuen monesta seikasta, kuten esimerkiksi käytettävästä järkäleestä ja koneen kunnosta. Iskutyynyllä on myös suuri vaikutus tuloksiin, onko käytössä puinen vai muovinen iskutyyny. Puinen iskutyyny voi syttyä palamaan, ja muovinenkin iskutyyny kuumenee, nämä johtavat materiaalin ominaisuuksien muuttumiseen. Mikäli mittauslaitteiston lähellä on sähkökaapeleita, ne voivat vaikuttaa tulokseen. Myös vesisade voi häiritä mitausta. Tuloksesta näkee kuitenkin hyvin, että onko tulos luotettava. Mikäli saatu signaali on hyvänlaatuista, myös tulos on suurella todennäköisyydellä tarkka. (Repo, Riihimäki. 2018.)

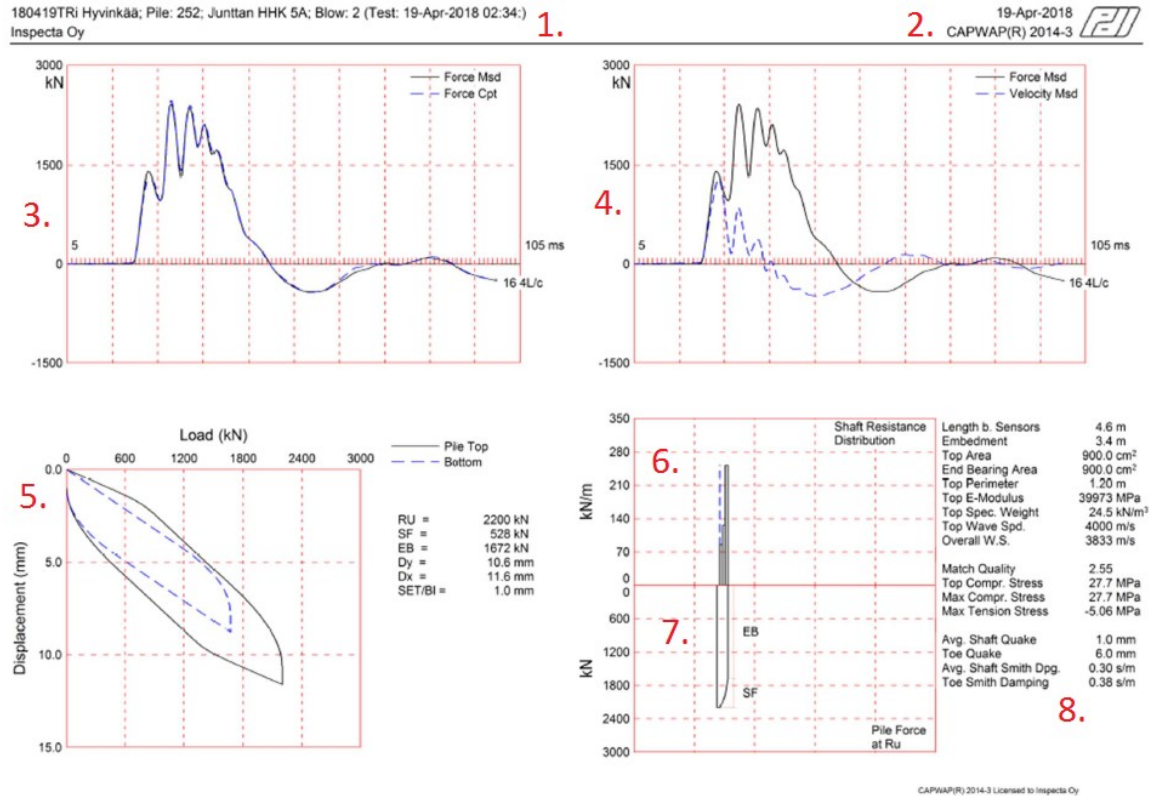
Koekuormituksesta tulee luoda raportti. Raportissa tulee olla soveltuvin osin seuraavat seikat RIL-207 mukaisesti:

- kuvaus rakennuspaikasta
- pohjaolosuhteet pohjatutkimusten perusteella
- paalutyypit
- kuvaus paalun asennuksesta ja töiden aikana havaituista ongelmista
- kuvaus kuormitus- ja mittauslaitteistosta sekä vastapainojärjestelmästä
- kuormitussellien, tunkkien ja antureiden kalibrointiasiakirjat
- koepaalujen paalutuspöytäkirjat
- valokuvatallenteet paalusta ja koealueesta
- koetulokset numeerisessa muodossa
- aika-siirtymäkuvaajat kullekin käytetylle kuormitusportaalille, jos käytetään portaitaista kuormitusta
- mitattu kuormitus-siirtymäkäyttäytyminen
- perustelut sille, joiden takia on poikettu edellä esitetystä vaatimuksista

Mittaaajan raportissa käytettyjen merkintöjen tarkoitukset on esitetty taulukossa 4.3. Lisäksi joskus suunnitelmissa vaaditaan signaalinmallinnusanalyysi, eli CAPWAP-analyysi. Tämän työn yhdessä kohteessa tehtiin myös kahdelle paalulle CAPWAP-analyysi, eli määriteltiin, kuinka suuri osa kantavuudesta tulee vaipalta ja kuinka suuri osa kärjestä, ja tämän lisäksi vaimennuskerroin saatiin tarkasti määritettyä. Kuvassa 4.8 on esitelty CAPWAP-tuloste, ja tämän alla selitykset eri osille. Tulosteen lisäksi PDA-raporttiin liitetään taulukot, joissa tarkat tiedot maamallin parametreista, paaluvastuksen herkkyydestä vaimennuskertoimen valinnalle ja jännitykset paalusegmenteissä.

Taulukko 4.3. Mittaajan raporteissa käytetyt merkinnöt. (Inspecta. 2018.)

Merkintä	Selitys
s/10	Pysyvä painuma 10 lyönnillä upotuksen loppuvaiheessa (Junttan HHK 5A, pudotuskorkeus 0,25/0,3 m)
C	Jousto koekuormitusiskulla (laskettu vähentämällä PDA-mittauksen DMXarvosta pysyvä painuma koekuormitusiskulla)
RMX	Mobilisoitunut staattinen vastus RMX estimaattia käyttäen
(R _{C,m}) _{mean}	Mittauksissa mobilisoituneiden staattisten vastusten keskiarvo
(R _{C,m}) _{min}	Pienin mittauksissa mobilisoitunut staattinen vastus
FMX	Maksimivoima paalussa
EMX	Paaluun siirtynyt energia
CSX	Maksimi puristusjännitys koko poikkileikkauksessa (FMX/AR)
CSI	Suurin hetkellinen puristusjännitys yksittäisen anturin kohdalla
TSX	Maksimi vetojännitys paalussa
VMX	Maksimi nopeus antureiden kohdalla
DMX	Suurin siirtymä antureiden kohdalla
FVP	Mitatun voiman ja nopeuden yhtämittaisuus
LE	Antureiden etäisyys paalun kärjestä
LP	Paalun maassa oleva pituus
AR	Paalun poikkipinta-ala
EMX	Paalun kimmomoduli
SP	Paalun tilavuuspaino
WS	Aallonnopeus paalussa



Kuva 4.8 Esimerkki CAPWAP-analyysistä, tämä kyseinen on yhden tapaustutkimuksen, Hyvinkään Astreankadun paalun numero 252 CAPWAP-analyysi. (Kuva: Inspectan. 2018.)

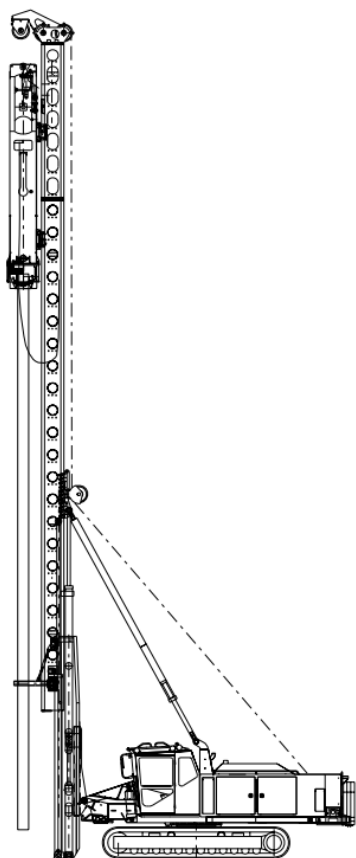
Kuvan eri osiot selitettynä:

1. Työmaa, paalun numero, lyöntijärjelmä, lyönnin numero, PDA-mittauksen päivämäärä sekä mittauksen tehnyt yritys
2. Analyysin päivämäärä ja ohjelmistoversio
3. Mitattu (Msd) ja laskettu (Cpt) voima-aikakuvaaja
4. PDA-mittauksessa mitattu voima-nopeuskuvaaja

5. Paalun ylä- ja alapään siirtymät kuorman funktiona, kokonaisvastus analyysin perusteella (RU), vaippavastus (SF), kärkivastus (EB), paalun elastinen kokoonpuristuma (Dy), paalun kokonaispainuma (Dx), paalun pysyvä painuma/lyönti (SET/BI)
6. Paalun vaippavastus paalusegmenteittäin
7. Paalun vaikuttava voima (RU) paalusegmenteittäin
8. Paalun kärjen etäisyys anturiin, maan alla oleva paalupituus, paalun pinta-alat, paalun tiheys, aallonnopeudet, MQ ”analyysin tarkkuus”, paalussa vaikuttavat jännitykset, quake-arvot vaipalla ja kärjessä sekä Smithin vaimennuskertoimet. Quake-arvoihin ja Smithin vaimennuskertoimiin ei paneuduta tarkemmin tässä työssä.

4.3 Tapaustutkimuksissa käytetty lyöntikalusto

Kaikissa rakennuskohteissa käytössä on ollut Junttan PM 20LC -mallinen paalutuskone, esiteltynä kuvissa 4.9a ja 4.9b. Paalutuskoneeseen on asennettu HHK 5A hydraulinen lyöntijärkäle, jonka maksimienergia pudotuksessa on 59 kNm. Paalutuskoneella voi lyödä 40-100 iskua minuutissa, ja pudotuskorkeuden voi säädellä 1,2 metriin saakka. Järkäleen paino on 5000 kg ja vasaran kokonaispaino 8600 kg. Paalutuskone vastapainoineen ja vasaroineen painaa yhteensä noin 60 000 kg. (Junttan. 2018.)



Kuva 4.9a Junttan PM 20LC piirrustuskuva. (Kuva: Junttan. 2018.) Kuva 4.9b Junttan PM 20LC työmaalla.

4.4 Rakennuskohteiden esittely

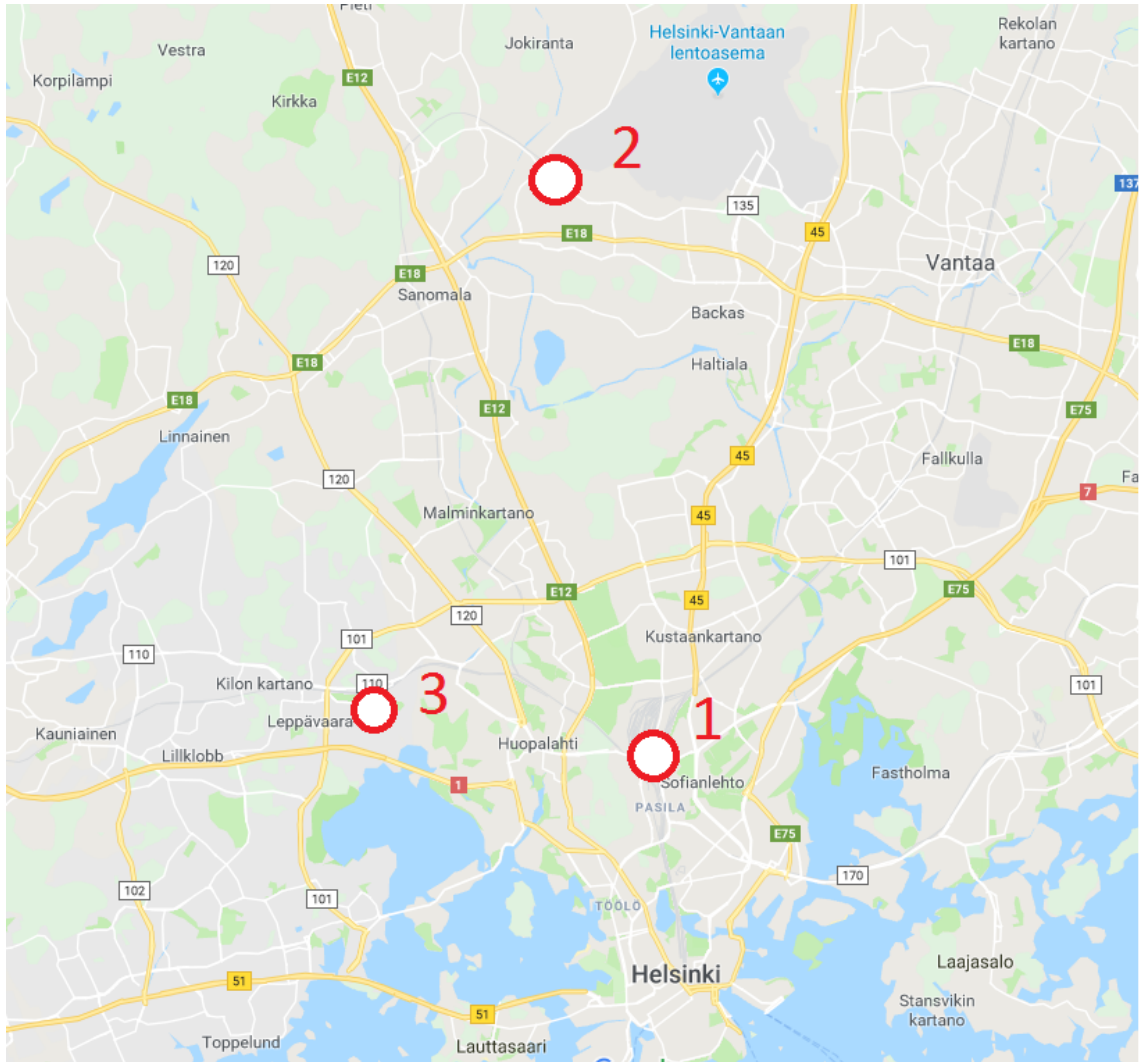
Tässä työssä esitellään neljä Suomen pääkaupunkiseudulla ja lähistössä paalutettua kohdetta, kuvassa 4.10 nähdään pääkaupunkiseudulla sijaitsevien työmaiden sijainnit kartalla. Kohteille yhteistä on, että niissä on käytetty teräsbetonipaaluja ja on tehty PDA-mittauksia, jonka perusteella on optimoitu loppulyöntiehtoja. Kolmessa kohteessa tehtiin PDA-mittauksia kahteen otteeseen samalle paalulle, ja täten pystyttiin seuraamaan kantavuuden kehitystä.

Ensimmäinen kohde on Veturitie Helsingissä. Veturitielle rakennetaan kaksitasoinen kiertoliittymä ja noin puoli kilometriä kadunpätkää. PDA-tulokset kohteessa olivat hyvät, ja loppulyöntiehtoja kevennettiin hieman. Tämä kohde esittelee tyypillisen tapauksen, monesti loppulyöntiehtoja voidaan keventää muutama millia.

Toinen kohde K3 Wihuri, joka sijaitsee Viinikkalassa, Vantaalla. Kohteeseen rakennettiin suuri logistiikkakeskus. Tällä työmaalla saatiin selkeät hyödyt loppulyöntiehtojen keventämisestä koepaalutuksen yhteydessä, pystyttiin lyhentämään paalua sen verran, että jatkopaalut muuttuivat yksimittaisiksi paaluiksi.

Kolmas kohde on Astreankadun 25 ja 27 koepaalutus Hyvinkäällä. Astreankatu 25 tulee Asokodit asunekerrostalo ja Astreankatu 27 tulee LUMO kerrostalo. Kohteessa suoritettiin koepaalutus ja paalujen PDA-mittaus viikoilla 16 ja 17, itse paalutustyö alkaa myöhemmin. Kohteessa saatiin hyviä kantavuuksia lyhyillä, jopa 5-metrisillä paaluilla, kun pohjatutkimuksissa arvioitu tunkeutumissyvyys oli yli 15 metriä paalujen yläpään tasosta.

Neljäs kohde on Asunto Oy Espoon Piruetti, joka sijaitsee Vermossa, Espoossa. Kohteessa oli haastavat pohjaolosuhteet, ja rakentamiseen liittyi erityispiirteitä. Loppulyöntiehtoja tiukennettiin tällä työmaalla, ja paalut oli lyötävä syvempään kuin mitä aikaisemmin arvioitu. Kun paalut oli lyöty syvemmälle, saatiin korkeita kantavuuksia paaluista. Joitakin paaluja mitattiin uudelleen, jotta nähtiin kantavuuden kasvu ajan myötä.



Kuva 4.10 Työmaiden sijainti kartalla. 1. Veturitie, 2. K3 Wihuri, 3. Espoon Piruetti. (Kuva: Googlemaps)

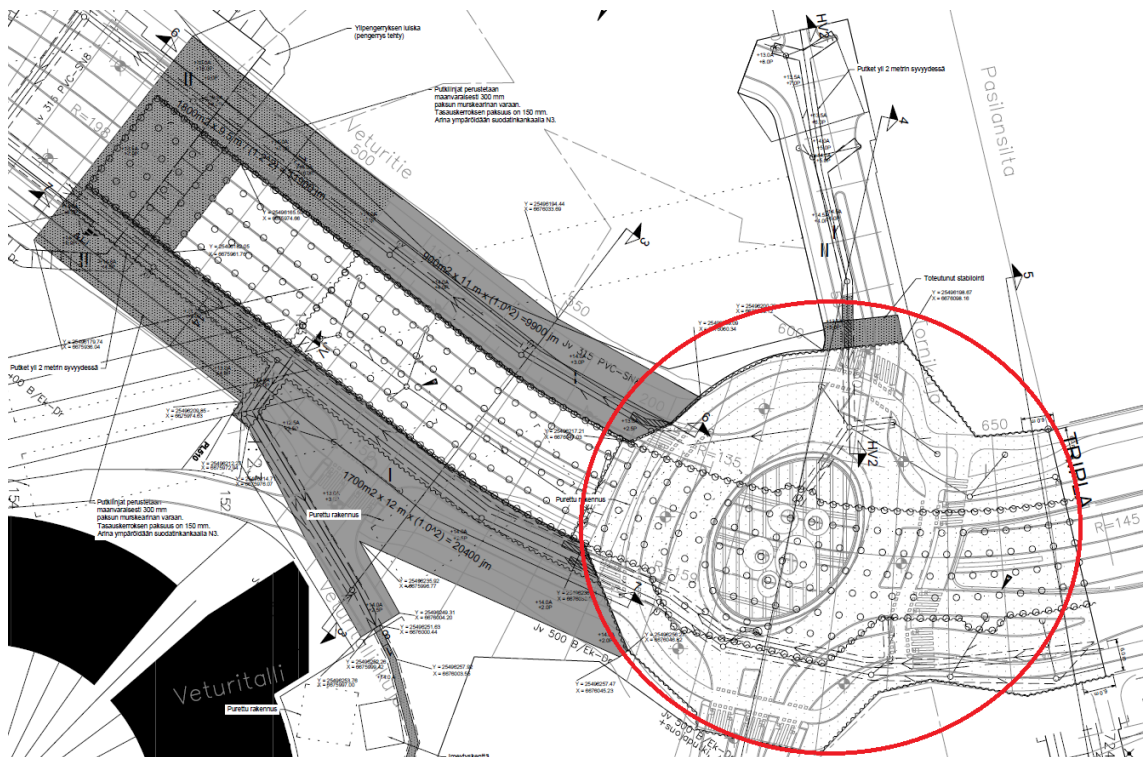
5 Tapaustutkimukset

5.1 Veturitie, Helsinki

5.1.1 Työmaan kuvaus

Tässä osiossa käsitelty työmaa on Keski-Pasilassa sijaitsevan Veturitien eteläosan ensimmäinen vaihe, lyhyesti ”Veturitie”. Hanke koostuu kaksitasoisesta kiertoliittymästä ja uudesta, noin puolen kilometrin mittaisesta, kadunpätkästä. Työmaa-alue sivuaa myös vierellä rakenteilla olevaa Tripla-kokonaisuutta. Uusi Veturitie on tarkoitettu käyttöön samalla kun Triplan kauppakeskus ja uusi Pasilan asema loppuvuodesta 2019.

Lyöntipaalutukset suoritettiin tammi-helmikuussa 2018. Kyseessä on vaativa infrarakenne, ja työmaalla tehtiin lyöntipaalutuksen lisäksi porapaalutusta, teräspontitusta, suihkuinjektointia ja kallion injektointia. Kuvassa 5.1 on esitetty kohteen pohjarakennuskartta, josta ilmenee työmaalla suoritettavat työlajit. Kuvan harmaat alueet ovat massastabiloitavia alueita, valkoiset ympyrät ovat stabilointipilareita. Paalutus suoritetaan kuvassa näkyvän kiertoliittymän kohdalla.



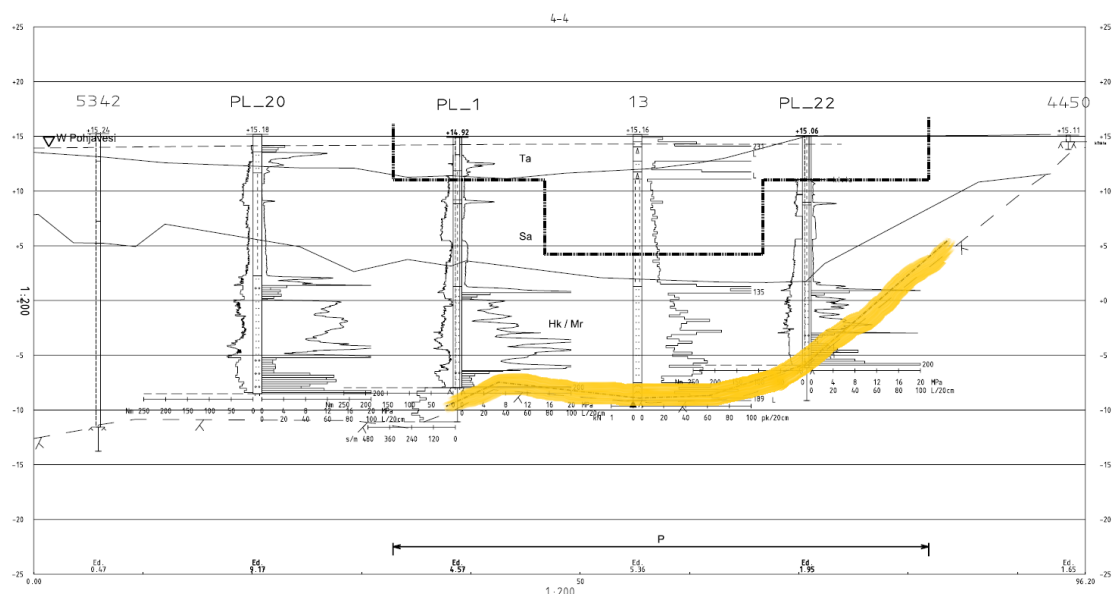
Kuva 5.1 Pohjarakennuskartta, josta ilmenee paalutettava alue. (Kuva: Insinööri Oy. 2017.)

5.1.2 Pohjaolosuhteet

Tässä kuvatut pohjaolosuhteet perustuvat FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy:n laatimaan työselostukseen, Insinööri Oy:n pohjaveden hallintasuunnitelmaan ja pohjatutkimusleikkauksiin. Kairaustiedot on saatu Helsingin kaupungilta ja GTK:n kairaustietokannoista, vanhimmat kairaukset ovat 1970-luvulta ja uusimmat

2000-luvulta. Täydentäviä tutkimukset on tehty vuonna 2015 koko Veturitien osalta, tällöin tehtiin tutkimuksia noin 200 pisteessä. Tutkimuksiin on käytetty niin puristinheijarikairausta, painokairausta, porakonekairausta kun siipikairaustakin, myös näytteitä on otettu koko alueelta. Alueella on tehty useita satoja kairauksia, ja näiden perusteella on voitu jakaa Veturitien työmaa eri alueisiin; kitkamaa-alueisiin, savialueisiin ja kallioalueisiin. Seuraavaksi kuvataan ainoastaan paalutettavan alueen pohjaolosuhteita.

Paalutusalue sijaitsee paaluvälillä 450-670. Maanpinta on tällä alueella noin tasolla +15, ja sen yläosassa on 1-2 metriä täyttöä. Täytön alla on 5-10 metrin paksuinen savikerros, jossa myös lieju- ja turvekerroksia. Savikerroksen alla on 10-15 metrin paksuinen kitkamaakerros. Kallionpinta on arvioitu olevan tasolla -12...-1. Pohjavesi on noin tasolla +13,5...+14,5. Kuvassa 5.2 on esitetty poikkileikkaus paalutusalueelta, keltaisella korostettu paalujen arvioitua tunkeutumissyvyyyttä. Veturitien pohjatutkimuskartta sekä leikkaus 3-3 on esitetty liitteissä 1 ja 2.



Kuva 5.2 Leikkaus 4-4, keltaisella korostettu paalujen arvioitu tunkeutumissyvyys. (Kuva: Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy. 2017.)

Veturitielle tehdään paalulaatta lyötävien teräsbetonipaalujen varaan, nämä tukeutuvat tiiviiseen maakerrokseen tai kallioon.

5.1.3 Paalutus

Veturitien paalutus suoritettiin Paalutusohje 2011 mukaisesti paalutusluokassa 2. Työmaalla käytettävät lyöntipaalut olivat TB350a-paaluja ja ne oli varusteltu maakärjillä. Paalujen rasitusluokaksi oli määritelty XC2 ja XA2, joten paalut oli SR-sementillä valmistettu. Lyöntipaaluja oli suoraan asennettavia mutta myös vinopaaluja, sekä suhteessa 1:8 että 1:16. Liitteessä 3 on esitetty kohteen paalukartta.

Kuvassa 5.3 on näkyvissä Veturitien työmaa Pasilan sillalta otettuna, kuvasta voi nähdä useamman eri työlahin samanaikaisesti työmaalla. Lyöntipaalutuskone on oikealla, ja koneen lähistössä suoritettiin myös porapaalutusta ja injektointia.



Kuva 5.3 Veturitien työmaa, paalutus käynnissä oikeassa alanurkassa.

Paalujen mitoituskuorma oli 1300 kN ja taulukossa 1 on esitetty kyseisen paalun loppulyöntiehdot Paalutuotelehti 2011 mukaisesti.

Taulukko 5.1 Lopetuslyönnit paalulle TB350a PO-2011 mukaisesti. (Lähde: Paalutuotelehti 2011.)

PTL 3	Lyöntilaite	Paalupituus [m]						Pudotuskorkeus	Lyöntienergia
		Painuma [mm]							
	Kiihdytetty hydraulijärkäle 5t	5	10	20	30	40	50	H[m]	E[tm]
		18	18	17	17	17	17	0,6	3,00

PDA-mittauksia tehtiin 5 prosenttiin paaluista. Vaatimus mittaustuloksille paalujen keskimääräiselle puristuskestävyydelle on mittaajan raportin mukaisesti

$$(R_{c,m})_{mean} = 1300 \text{ kN} \times 1,5 \times 1,2 = 2340 \text{ kN}$$

ja vaatimus paalujen minimi puristuskestävyydelle on

$$(R_{c,m})_{min} = 1300 \text{ kN} \times 1,35 \times 1,2 = 2106 \text{ kN}$$

5.1.4 PDA-mittaustulokset

Veturitiellä tehtiin PDA-mittaus kaksi kertaa. Ensimmäinen kerta oli koepaalujen PDA-mittaus, jonka perusteella määriteltiin loppulyönnit kohteeseen. Koepaaluja mitattiin yhteensä seitsemän kappaletta, ja tulokset on esitetty taulukossa 5.2. Liitteessä 4 on esitelty muutaman esimerkkikoepaalun PDA-mittausten iskuaaltokuvaajat.

Taulukko 5.2. Koepaalutuksen PDA-mittauksen tulokset 1.2.2018. (Inspecta. 2018.)

Numero	Paalu		Loppulyönnit		Koekuormitusisku		Kestävyys RMX [kN]
	Pvm.	LE [m]	Pudotuskorkeus [m]	s/10 [mm]	EMX [kNm]	DMX [mm]	
P8	31.1.	21,4	0,45	17	26,7	17,0	2811
P10	31.1.	21,4	0,30	19	31,5	17,0	2905
P12	31.1.	21,0	0,16	19	33,2	19,0	2813
P14	31.1.	20,0	0,30	24	36,7	20,0	2729
P22	31.1.	20,5	0,40	20	35,4	20,0	2646
P26	31.1.	23,0	0,25	18	39,8	19,0	2899
P32	31.1.	20,9	0,35	17	36,9	17,0	3345
(Rc;m)mean							2878
(Rc;m)min							2646

Mittaajan mittausraportissa uudet loppulyöntiehdoksi määriteltiin pudotuskorkeus 0,35 metriä sekä painuma 10 lyönnin sarjalla alle 20 millimetriä. Ero taulukoissa määritellyyn painumaan on 3 millimetriä.

Veturitiellä tehtiin toinenkin mittaus, jossa pystyttiin arvioimaan uuden loppulyöntiehdon toimivuutta. Tällä mittauksella mitattiin myös 12 paalua, jotka kaikki oli lyöty uusien loppulyöntiehtojen mukaisesti. Taulukossa 5.3 on esitelty tämän PDA-mittauksen tulokset.

Taulukko 5.3 Veturitien paalutuksen PDA-mittauksen tulokset 12.3.2018. (Inspecta. 2018.)

Numero	Paalu		Loppulyönnit s/10 [mm]	Koekuormitusisku		Kestävyys RMX [kN]
	lyöty	LE [m]		EMX [kNm]	DMX [mm]	
912	12.3.	17,0	<20	30,4	19	2534
1010	12.3.	16,3	<20	29,4	18	2872
1046	9.3.	15,4	<20	32,7	17	2995
1081	9.3.	15,1	<20	31,8	16	2984
1099	9.3.	14,9	<20	37,2	20	2396
1113	9.3.	12,3	<20	28,0	16	2407
1115	8.3.	12,6	<20	38,5	20	2629
1119	8.3.	11,5	<20	31,7	17	2418
1124	8.3.	11,1	<20	24,9	14	2802
1126	8.3.	10,2	<20	25,6	14	2433
1135	8.3.	7,8	<20	30,6	15	2503
1136	8.3.	7,2	<20	29,2	14	2709
(Rc;m)mean						2640
(Rc;m)min						2396

Raportissa todettiin, että kaikille paaluille saatiin mobilisoitua riittävä staattinen vastus mitoituksuormaan nähden, eli koepaalutuksen yhteydessä määritellyt loppulyöntiehdot näyttävät soveltuvan kohteeseen hyvin.

5.1.5 Pohdinta

Veturitie edustaa aika tavanomaista työmaata PDA-mittausten hyödyntämisen suhteen urakoitsijan näkökannasta, eli loppulyöntikriteerejä pystyttiin keventämään muutaman millia. Käytännössä tämä ei vaikuttanut merkittävästi esimerkiksi paalun pituuksiin. To- teutunut paalumäärä oli ainoastaan pari sataa metriä vähemmän kuin laskettu määrä, joka lähenteli 8 kilometriä. On vaikea sanoa, riippuuko parin sadan metrin ero loppulyöntiehd- doista vai ihan maaperän vaihtelevuudesta. Paaluja ei kuitenkaan tarvinnut lyödä ihan niin kauan, eli pienoinen ajansäästö saatiin optimoitujen loppulyöntikriteerien avulla. Loppulyöntiehtojen keveneminen on myös tärkeää siltä kannalta, ettei paaluille ei tule ylimääräistä rasitusta. Kun lyödään paaluja tiukassa maaperässä ja lyöntejä tulee tuhansia, on vaara, että paalu rasittuu liikaa, ja menee poikki.

Taulukon mukaiset loppulyöntikriteerit:	17 mm/10 iskua
PDA-mittaukseen perustuvat loppulyöntikriteerit:	20 mm/10 iskua

Toisen PDA-mittaukserän tuloksista pystytään todeta, että uudet loppulyöntikriteerit so- veltuivat kohteeseen hyvin, ja saatiin helposti vaadittavat kantavuudet kaikille paaluille. Mitään paalua ei mitattu useampaan otteeseen, joten aikakehitystä tällä työmaalla ei pys- tytty tekemään. Veturitiellä, kuten monella paalutustyömaalla, ei ollut mahdollista palata paalutuskoneella jo lyötyjen paalujen lähistölle, eikä täten mittausta pystytty uusimaan. Tämä on usein ongelma työmailla, että tilaa on rajoitetusti. Mittaukset on tehtävä miltein heti, kun paalut on asennettu, sillä muuten paalutuskone ei pääse enää paalujen lähelle. Tämä tarkoittaa siis, että aika harvoin pystytään mittaamaan samaa paalua uudestaan ja myös sitä, että paalut eivät ole niin kauaa maassa ennen mittausajankohtaa.

5.2 K3 Wihuri, Vantaa

5.2.1 Työmaan kuvaus

K3 Wihuri on Vantaalla sijaitseva rakenteilla oleva uusi logistiikkakeskus, jonka on määrä valmistua vuoden 2018 lopulla. Kyseessä on noin 25 000 m² toimisto- ja logistiik- kakeskus. K3 on yritysalue Vantaan Viinikkalassa. Paalutustyöt suoritettiin alkuvuodesta 2017.

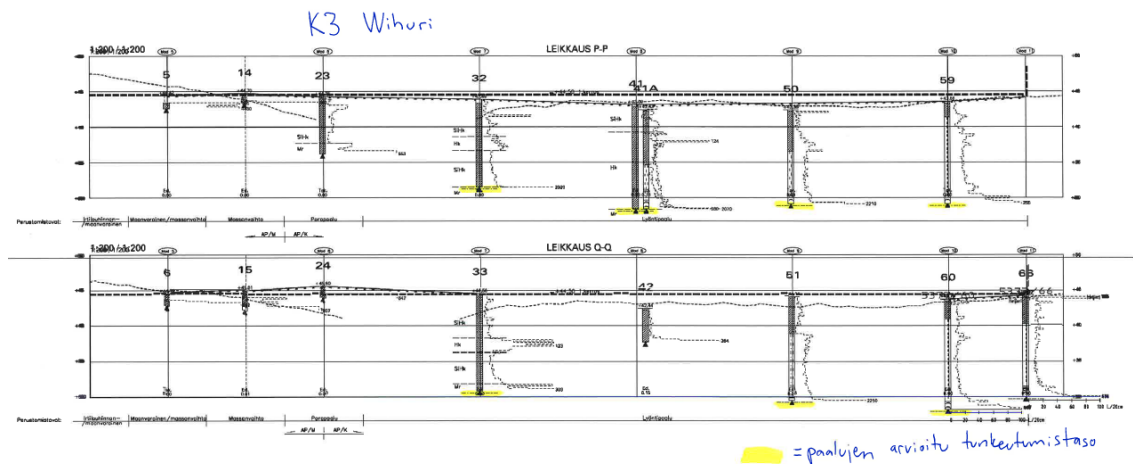
5.2.2 Pohjaolosuhteet

Pohjaolosuhteet perustuvat Insinööritoimisto EUROGEO Oy:n laatimaan perustamista- pasuositukseen (12.12.2016). Rakennuskohtainen pohjatutkimus on tehty loka-marras- kuussa 2016 ja on myös hyödynnetty vuonna 2009 tontilla tehdyn yleispiirteisen pohja- tutkimuksen tuloksia. Tontilla on tehty painokairauksia ja heijarikairauksia yhteensä noin 80 pisteessä. Porakonekairausta käytettiin tontin itäosassa sijaitsevassa täytemaassa.

Luonnollinen topografia on ollut monipuolinen, pohjois- ja länsiosassa tonttia on ollut kalliokumpare. Esirakennustöiden yhteydessä työmaalla louhittiin maanpinta tasaiseksi noin tasolle +43. Tontille rakennettiin 1970-luvulla prosessiallas, joka on sittemmin täy- tetty moreenimaalla. Tonttia on käytetty louheen murskaukseen ja murskausmateriaaliin, ja varastoitu murske on toiminut esikuormituksena työmaa-alueella.

Tontin pohjois- ja länsiosassa on kallion päällä paikoittain humuskerros sekä tiivis kerros sisältäen hiekkaa ja moreenia. Tontin itä- ja eteläosassa taas täyttömaan alla on yli 30 vuotta maatunut turvekerros, jonka alla noin 5-6 metrin paksuinen savikerros. Savikerroksen alla on silttikerros, ja tämän alapuolella hiekkaa ja/tai moreenia. Kallionpinta on syvimmillään tasossa ~15. Maaperä on routivaa. Negatiivista vaippahankausta ei tarvitse huomioida.

Kuvassa 5.4 näkyvissä kaksi pohjatutkimusleikkausta, jossa arvioitu paalujen tunkeutumistaso esitelty. Arvioitu tunkeutumistaso vaihtelee esimerkiksi leikkauksessa Q-Q noin +26 ja +30 välillä, joka tarkoittaa paalujen katkaisutasen ollessa +42, että paalut ovat 12-16 metrisiä. K3 Wihurin pohjatutkimuskartta ja leikkaus L-L ja M-M on esitetty liitteissä 5 ja 6.

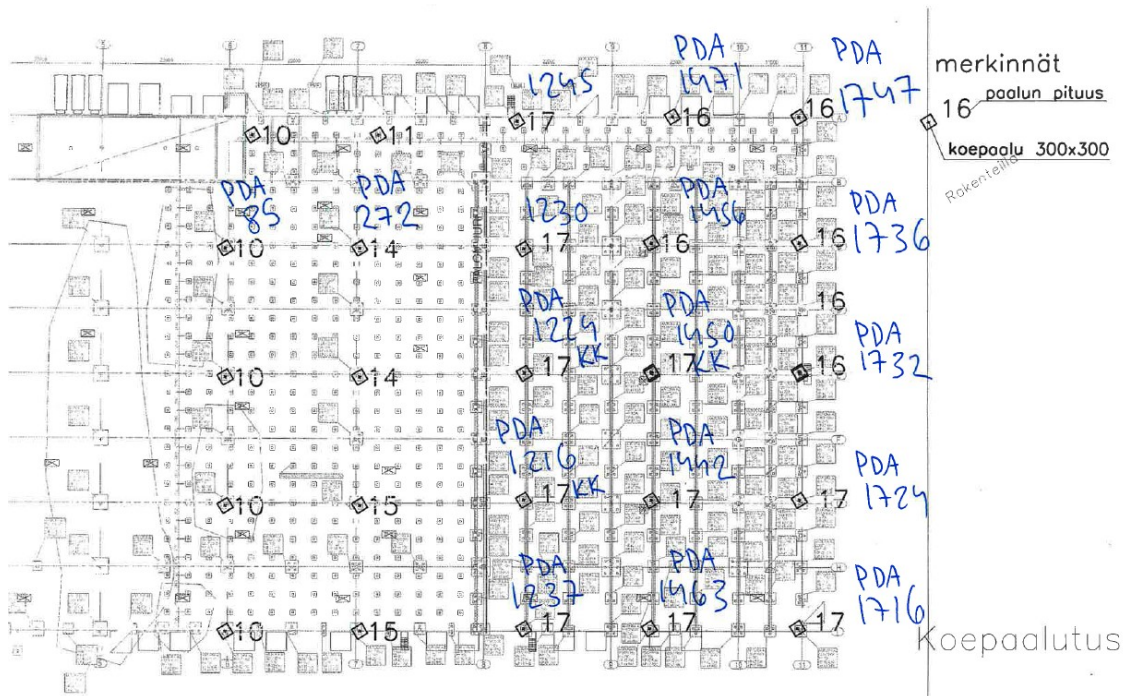


Kuva 5.4 P-P ja Q-Q leikkaukset Wihurin työmaalta, keltaisella merkitty paalujen arvioitu tunkeutumistaso. (Kuva: Insinööritoimisto EUROGEO Oy. 2016.)

Perustamistavoiksi ehdotettiin pohjois- ja länsiosaan murskepatjaa, maanvaraista perustusta ja massanvaihtopenkerettä. Tontin itä- ja eteläosaan ehdotettiin paalutusta maapohjan heikon kantavuuden takia. Paaluiksi ehdotettiin ensisijaisesti TB300b-paalua paalutustyöluokassa 2. Louhetäyttöisessä vyöhykkeessä, jossa jouduttiin suorittamaan porakonekairaukset, käytetään kalliokärkiä, muualla maakärkiä.

5.2.3 Paalutus

Rakennuskohteeseen tehtiin ennen varsinaisen paalutuksen aloitusta koepaalutus. Koepaaluille suoritettiin PDA-mittaus, ja näin varmistettiin tarvittava kantavuus paaluissa sekä ajantasaiset loppulyöntiehdot paalutustyölle. Koepaalujen sijainnit on esitetty kuvassa 5.5. Yhteensä 15 paalulle tehtiin PDA-mittaukset. Koepaalutuskuvasta ilmenee, että suurin osa paaluista oli tarkoitus lyödä 16 tai 17 metrisellä paalulla, eli jatkettavina paaluina.



Kuva 5.5 Koepaalujen sijainnit paalukartalla. Paalujen kohdalle merkitty kyseisen paalun numero, ja kk merkintä tarkoittaa kalliokärkeä. (Kuva: Insinööritoimisto EUROGEO Oy. 2016.)

Paalutustyöluokka kohteessa oli PTL2 ja puristuskestävyyden mitoitusarvo $R_{d,max}$ teräsbetonipaaluille oli oltava vähintään 850 kN/m^2 . Taulukossa 5.4 on esitetty Paalutuotelehti 2011 mukaiset loppulyönnit kyseiselle paalutyypille.

Taulukko 5.4. Lopetuslyönnit paalulle TB300b PO-2011 mukaisesti. (Paalutuotelehti 2011.)

PTL 2	Lyöntilaite	Paalupituus [m]						Pudotuskorkeus	Lyöntienergia
		Painuma [mm]							
	Kiihdytetty hydraulijärkäle 5t	5	10	20	30	40	50	H[m]	E[tm]
		23	19	18	18	17	17	0,3	1,50

PDA-mittauksia tehtiin 15 koepaalulle. Vaatimus mittaustuloksille paalujen keskimääräiselle puristuskestävyydelle on mittajaan raportin mukaisesti

$$(R_{c,m})_{mean} = 850 \text{ kN} \times 1,42 \times 1,2 = 1448 \text{ kN}$$

ja vaatimus paalujen minimi puristuskestävyydelle on

$$(R_{c,m})_{min} = 850 \text{ kN} \times 1,25 \times 1,2 = 1275 \text{ kN}$$

5.2.4 PDA-mittaustulokset

Wihurin työmaalla suoritettiin PDA-mittaukset yhteensä kolme kertaa. Työmaalla tehtiin koepaaluutus, jota seurasi kohteen ensimmäinen PDA-mittaus. Taulukossa 5.5 koepaaluutuksen koekuormituksen tulokset. Kaikki paalut täyttivät vaatimukset, ja loppulyöntikriteerejä pystyttiin keventämään huomattavasti. Liitteestä 7 löytyy muutaman esimerkki-koepaaluun PDA-mittausten iskuaaltokuvaajat.

Taulukko 5.5 Koepaaluutuksen PDA-mittauksen tulokset. Paalut, joiden perässä merkintä (KK) on varusteltu kalliokärjillä. (Inspecta. 2016.)

Numero	Paalu	Loppulyönti s/10[mm]	Koekuormitusisku		Kestävyys RMX [kN]
	LE [m]		EMX [kNm]	DMX [mm]	
P85	9,3	24	29,4	18,0	2303
P272	12,7	15	38,9	20,0	2507
P1216(KK)	15,4	27	31,0	19,0	1831
P1224(KK)	15,4	21	32,2	19,0	1966
P1237	15,4	20	31,5	21,0	2023
P1442	14,5	14	35,2	22,0	1844
P1450(KK)	13,8	17	37,6	18,0	2432
P1456	14,5	30	34,6	24,0	1461
P1463	16,0	24	37,1	25,0	1493
P1471	12,9	15	43,0	20,0	3199
P1716	15,3	22	37,8	25,0	1716
P1724	14,8	19	44,4	23,0	2490
P1732	13,5	18	36,7	22,0	1764
P1736	14,4	28	37,8	22,0	1818
P1747	13,5	20	36,4	22,0	2079
(Rc;m)mean					2062
(Rc;m)min					1461

Perustamistapalausunto päivitettiin PDA-mittausten perusteella. Paalujen uudeksi puristuskestävyyden mitoitusarvoksi määriteltiin 930 kN, rakennesuunnittelijan mukaan kantavaan alapohjaan kohdistuu paikoitellen aiempaa arvoa suurempi kuormitus. Vaatimus mittaustuloksille paalujen keskimääräiselle puristuskestävyydelle on tällöin

$$(R_{c;m})_{mean} = 930 \text{ kN} \times 1,42 \times 1,2 = 1584 \text{ kN}$$

ja vaatimus paalujen minimi puristuskestävyydelle on

$$(R_{c;m})_{min} = 930 \text{ kN} \times 1,25 \times 1,2 = 1395 \text{ kN}$$

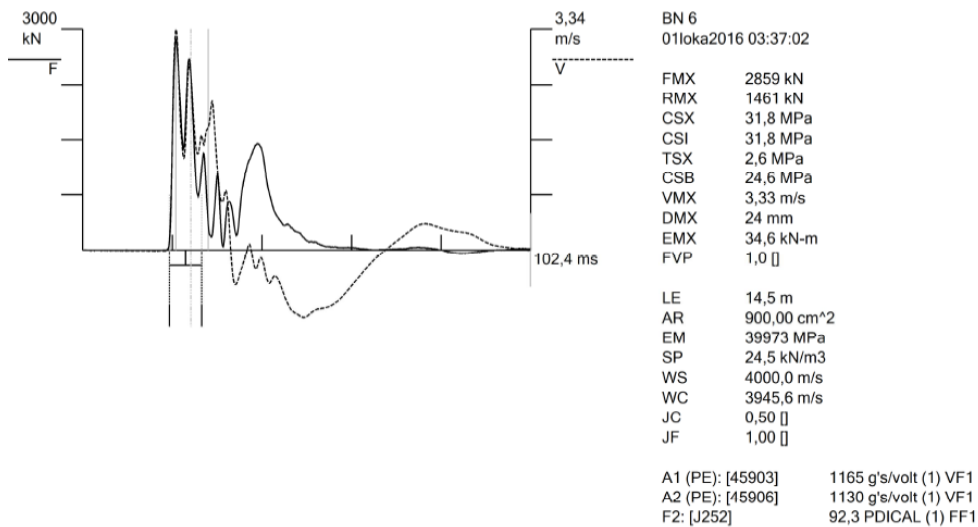
Myös nämä ehdot täyttyivät kaikkien paalujen osalta. Uudet loppulyöntikriteerit olivat PDA-raportin mukaisesti painuma alle 25 mm/10 iskua ja pudotuskorkeutena 0,2 metriä.

Seuraavan kerran PDA-mittauksia tehtiin 26.1.2017, ja tällöin koekuormitettiin kuusi maakärjellistä paalua ja yksi kalliokärjellä varusteltu paalu, paalunumero 1230. Paaluissa ei havaittu vaurioita. Tulokset tästä mittauksesta on esitetty taulukossa 5.6. Näiden paalujen lisäksi koekuormitettiin paalu P1456 uudestaan, joka kuormitettiin myös koepaaluuden yhteydessä. Edellisessä mittauksessa paalulle saatiin mobilisoitua 1461 kN vastus, ja uuden mittauksen yhteydessä 6 viikkoa myöhemmin, saatiin mobilisoitua 2560 kN geotekninen kestävyys. Loppulyöntit olivat koepaaluutuksen yhteydessä 30 mm/10 iskua, ja tällä mittauksella 8 mm/10 iskua. Paalun 1456 iskuaaltokuvaajat on esitetty kuvissa 5.6 ja 5.7. Tämän perusteella voidaan olettaa, että myös muiden paalujen geotekninen kantavuus on kasvanut huomattavasti ajan kuluessa.

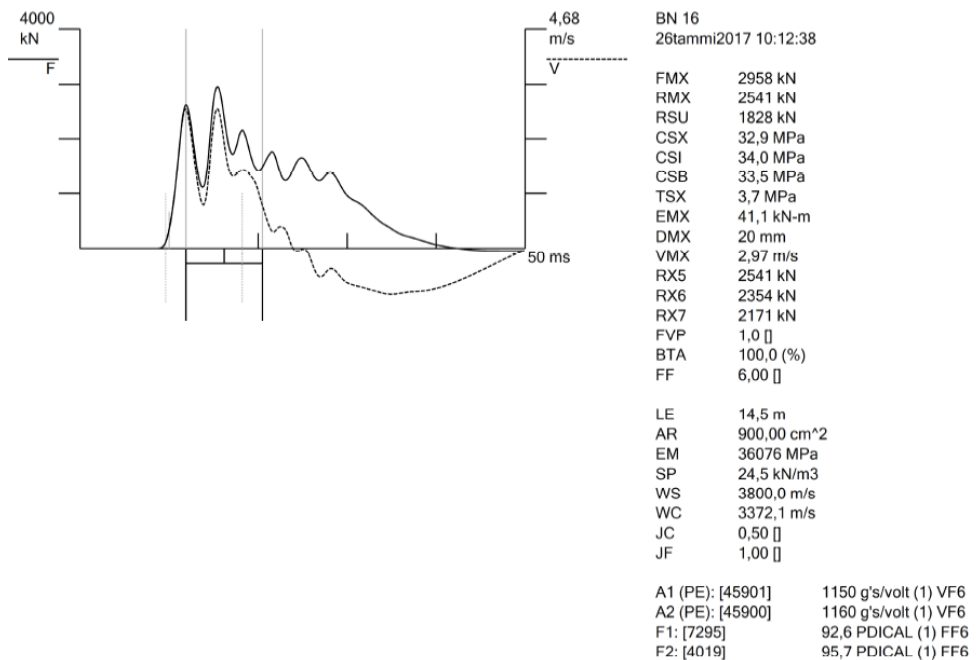
Taulukko 5.6 PDA-mittauksen 26.1.2017 tulokset. (Inspecta. 2017.)

Numero	Paalu	Loppulyöntit s/10[mm]	Koekuormitusisku		Kestävyys RMX [kN]
	LE [m]		EMX [kNm]	DMX [mm]	
P1230	15,6	20	31,1	19,0	1887
P2293	13,1	20	55,3	36,0	1465
P2360	14,3	26	28,7	19,0	1757
P2450	13,5	13	30,7	22,0	1686
P2471	12,6	20	34,4	23,0	1568
P2474	12,2	20	35,5	22,0	1634
(Rc;m)mean					1666
(Rc;m)min					1465

PDA-raportissa todetaan, että koepaalutuksen yhteydessä esitetty loppulyöntikriteeri 25 mm/10 lyöntiä ja pudotuskorkeus 0,2 metriä soveltuu kohteeseen hyvin.



Kuva 5.6 Paalun 1456 iskuaaltokuvaaja koepaalutuksen mittauksen yhteydessä. (Kuva: Inspecta. 2016.)



Kuva 5.7 Paalun 1456 iskuaaltokuvaaja uudelleenmittauksen 26.1.2017 yhteydessä. (Kuva: Inspecta. 2017.)

Seuraavat PDA-mittaukset tehtiin 14.2.2017 ja tällöin mitattiin 11 maakärjellistä paalua. Kaksi näistä, 240A ($\beta = 64 \%$) ja 2083 ($\beta = 49 \%$) olivat vaurioituneita noin 2,5-3 metrin etäisyydeltä paalun kärjestä, mutta niihin muodostui niin sanotusti ”uusi kärki”, joka tukeutui kantavaan kerrokseen. Kaikilla paaluilla, jopa vaurioituneilla, oli kaikilla riittävästi kantavuutta. Todettiin, että koepaalutuksen yhteydessä määritellyt loppulyöntiehdot vaikuttaisivat toimivan hyvin. Taulukossa 5.7 on esitetty mittauksen tulokset.

Taulukko 5.7 PDA-mittauksen 26.1.2017 tulokset. (Inspecta. 2017.)

Paalu		Loppulyönnit	Koekuormitusisku				Kestävyys
Numero	LE [m]	s/10 [mm]	EMX [kNm]	s [mm]	DMX [mm]	c [mm]	RMX [kN]
L1	12,4	23	36,5	-	22	-	1841
P73	7,0	21	23,8	-	14	-	2237
P126	9,2	12	17,7	-	12	-	2380
P204A	10,4	19	46,0	-	26	-	1587
P234	12,5	18	47,3	-	27	-	1672
P240A	11,6	4	37,0	-	20	-	1713*
P279	9,6	8	28,9	-	14	-	3062
P295	10,0	10	26,3	-	16	-	1733
P2076	12,0	21	37,3	-	22	-	1745
P2078	13,2	20	36,3	-	20	-	1966
P2083	12,0	20,0	43,7	-	20	-	1865*
*Mittaushetkellä mobilisoitunut staattinen vastus. Paalut vaurioituneita.						(Rc;m)mean	2025
						(Rc;m)min	1587

*Mittaushetkellä mobilisoitunut staattinen vastus. Paalut vaurioituneita.

5.2.5 Perustamistavan muutokset

Koepaalutuksen perusteella todettiin, että koko alue pystyttiin perustaa lyöntipaaluilla, eikä tarvittu porapaaluja, kuten suunniteltu. Porapaalujen vaihto lyöntipaaluuihin tarkoittaa huomattavaa rahallista etua, porapaalujen hinnan ollessa noin kolminkertainen lyöntipaaluuihin verrattuna. Uudet loppulyöntikriteerit mahdollistivat lyhyemmän paalun käytön. Kaikki paalut pystyttiin lyödä yksimittaisina, eli säästää sekä ajallisesti että rahallisesti, kun jatkokset jäivät pois. Urakoitsija sai myös itse päättää, käyttääkö paaluissa maavai kalliokärkiä. Urakoitsija valitsi maakärjet, ja myös tämän kautta tuli rahallista säästöä. Paaluryhmistä pystyttiin myös vähentämään paaluja, koska paaluille tuli niin paljon kantavuutta. Yhteensä 20 paalua jäi pois alkuperäisiin suunnitelmiin verrattuna.

5.2.6 Pohdinta

K3 Wihuri oli työmaa, jossa pystyttiin selkeästi hyödyntämään PDA-mittausta paalutuksen nopeuttamiseen, loppulyöntiehtojen keventyessä huomattavasti. Työmaalla huomattiin myös, että ajan myötä paalujen kantavuus nousi huomattavasti. Työmaalla saatiin rahallista hyötyä monella tavalla, porapaalujen muuttuessa lyöntipaaluiksi, jatkosten poistaminen sekä kalliokärkien vaihto maakärjiin. Wihurin kaltaisilla työmailla on siis hyvinkin kannattavaa suorittaa PDA-mittauksia, vaikkei niitä vaadittaisikaan. Kuinka paljon työ lyheni kestoltaan, on vaikea arvioida, sillä työmaa eteni muuten hitaasti. Alueella sai paalutta ainoastaan tiettyinä määrättyinä aikoina, läheisen lentoliikenteen vuoksi.

Taulukon mukaiset loppulyöntikriteerit:

17-18 mm/10 iskua

PDA-mittaukseen perustuvat loppulyöntikriteerit:

25 mm/10 iskua

5.3 Hyvinkään Astreankatu

5.3.1 Työmaan kuvaus

Hangonsillan alueelle, Hyvinkäälle, rakennetaan YIT Talon OY:n toimesta kaksi 4-6 kerroksista asuinkerrostaloa sekä kevyt ulkovälinevarasto. Tontin länsiosaan tulee kerrostalo Asokodit, joka on 4-6 kerroksinen asuinkerrostalo. Itäosaan tulee kerrostalo LUMO, joka on 6-8 kerroksinen asuinkerrostalo. Työmaan osoite on Astreankatu 25 (Asokodit) ja 27 (LUMO), 05900 Hyvinkää. Kohteessa suoritettiin koepaalutus sekä paalujen koe-kuormitus huhtikuussa 2018. Varsinainen paalutustyö alkaa kesäkuussa 2018. Kuvassa 5.8 on kuva työmaasta, kuva otettu koepaalutuksen jälkeen.



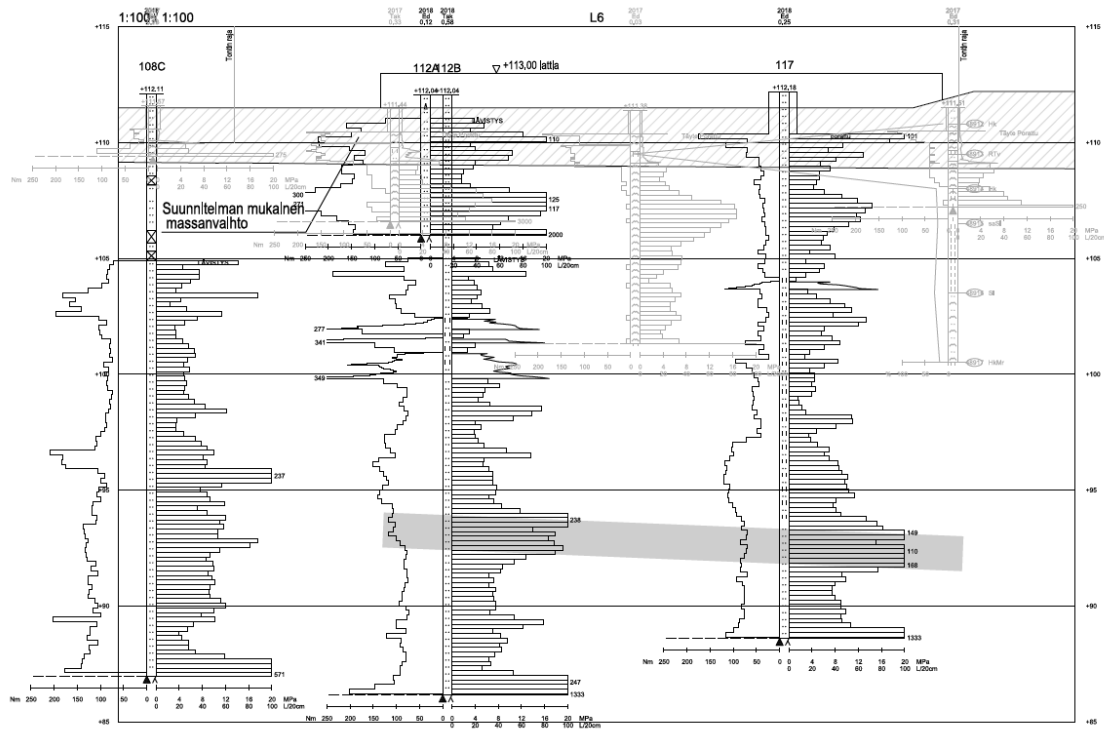
Kuva 5.8 Ason pohja kauempana, ja Lumon lähempänä. Koepaalut lyöty, 10 paalua kummallekin pohjalle.

5.3.2 Pohjaolosuhteet

Finnmap Infra on laatinut perustamistapalausunnon sekä perustusten paalutusohjeen. Uusimmat suunnitelmat ovat päivätty 26.3.2018. Pohjasuunnittelija laati koepaalutuksen jälkeen tarkennetut paalutusohjeet kohteelle.

Tontilla on tehty aikaisempia pohjatutkimuksia vuonna 2017, ja näiden lisäksi on tehty 10 puristinheijarikairausta kummallekin tontille ja otettiin näytteitä viidestä pisteestä Ason tontilta ja neljästä pisteestä LUMOn tontilta. Tontit sijaitsevat entisen suon kohdalla. Tonteilta on poistettu vanhoja täyttökerroksia ja turvetta, ja sittemmin täytetty so-ramontun rinnesoralla ja hiekalla kerroksittain tiivistämällä täryjyrällä. Paikoin täyttö on

niin tiivistä ja kivistä, että kairausta varten jouduttiin osittain lävistämään maata poraamalla. Täytön alaosa on kuitenkin löyhää. Täytötkerroksen alla on siltistä hiekkaa, hiekkaa ja hiekkamoreenia. Näiden alapuolella maaperä on hieman löyhempää koostuen hiekkasta ja siltistä. Lisäksi alueella on paikoittain noin metrin paksuisia löyhiä, siltisiä kerroksia, jossa puristinheijarikairaus on edennyt puristamalla. Maaperässä on satunnaisesti kiviä ja lohkareita. Kairaukset ovat päättyneet hyvin vaihtelevasti 2-27 metrin syvyyteen maanpinnasta. Kuvassa 5.9 on esitetty L6-poikkileikkaus. Liitteessä 8 ja 9 ASO:n ja Luimon pohjatutkimuskartat ja liitteessä 10 A5-pohjatutkimusleikkaus.



Kuva 5.9 L6-poikkileikkauksesta pystytään näkemään, että maa on vaihtelevan tiukkaa parikymmentä metriä ennen kairauksen päättymistä. Harmaa paksu viiva esittää lyöntipaalujen suunnitellun tunkeutumissyvyyden. (Kuva: Finnmap Infra. 2018.)

Perustamistapalausunnossa ehdotetaan tukipaaluja perustamistavaksi, ja paalut tulee varustaa kalliojärjillä. Lyöntityö tehdään paalutusohje 2016 mukaisesti paalutusluokassa 2. Paalujen kantavuus tarkistetaan PDA-mittauksilla viikkoa myöhemmin koepaalujen asennuksesta. PDA-mittausten tuloksille täytyy tehdä myös signaalimallinnus, CAPWAP-analyysi. Paalujen kärjet tulee upottaa löyhien kerroksien alapuolella, tasoon, joka on esitetty pohjatutkimusleikkauksissa.

5.3.3 Paalutus

Kohteessa käytettiin kalliojärjillä varustettua TB300b-paaluja ja paalutus tehtiin Paalutusohje 2016 ja suunnittelijan ohjeiden mukaisesti. Rakennesuunnittelijan laatimat paalutusohjeet olivat seuraavat (Päijät-Suunnittelu. 2018.):

- rakennus perustetaan tukipaaluille Finnmap Infra:n laatiman pohjatutkimuksen mukaan
- paaluina käytetään teräsbetoniisia 300x300 mm² paaluja

- paalut varustetaan kalliokärjillä
- paalutus tehdään julkaisun ”RIL 254-2016, Paalutusohje 2016” mukaan
- paalujen betonin nimellislujuuden oltava vähintään K45 (C35/45)
- paalutusluokka PTL2
- sallittu paalukuorma 630 kN/paalu
- paalun yläpää upotetaan anturavaluun vähintään 50 mm
- paalutustyöstä pidetään paalukohtaista paalutuspöytäkirjaa
- paalupituuden Finnmap Infra:n suunnitelmien mukaan
- paalun minimireunaetäisyys anturan reunasta 150 mm
- paalujen minimikeskiöetäisyys katkaisutasossa 900 mm
- paalut katkaistaan leikkaamalla siten, että nurkkateräkset leikataan poikki ja paalu katkaistaan esim. kaivinkoneella
- Huom! Paalutustyötä ei saa suorittaa 15 m:ä lähempänä valettavaa/sitovaa anturaa, ellei betoni ole saavuttanut vähintään 60 % suunnittelulujuudestaan C35/45:sta

Puristuskestävyyden mitoitusarvo $R_{d,max}$ teräsbetonipaaluille on oltava vähintään 630 kN, ja PDA-mittauksella mitattavan murtokuorman suuruus tulee olla vähintään 1260 kN lyöntipaalutusohje 2005 mukaisesti paalutusluokassa 2. Taulukossa 5.7 on esitetty Paalu-
tuotelehti 2011 mukaiset loppulyönnit kyseiselle paalutyypille.

Taulukko 5.7 Lopetuslyönnit paalulle TB300b. (Paalutuotelehti 2011.)

PTL 2	Lyöntilaite	Paalupituus [m]						Pudotuskorkeus	Lyöntienergia
		Painuma [mm]							
	Kiihdytetty hydraulijärkäle 5t	5	10	20	30	40	50	H[m]	E[tm]
		23	19	18	18	17	17	0,3	1,50

Kohteessa suoritettiin koepaalutus huhtikuussa 2018 miltei heti paalutuksen jälkeen. Oli tarkoitus tehdä mittausta uudestaan viikkoa myöhemmin, mutta todettiin, ettei sille ollut tarvetta. Paaluilla oli jo riittävä kantavuus. Koepaaluina käytettiin jatkettavia alapaaluja, mutta paaluihin ei ollut tarvetta lyödä yläpäitä. Maaperä oli tasaisen tiukkaa, ja paalu hakkautti kovasti koko matkan. Painumat olivat monessa kohtaa hyvin samanlaisia koko paalun upotuksen ajan. Joidenkin paalujen kohdalla painuma oli 20 millimetrin luokkaa 3 metrin syvyydessä. Paalut lyötiin useampaan eri syvyyteen, jotta voitaisiin verrata kantavuutta näissä ja päätellä loppulyöntikriteerit sopiksi. Painuma kymmenellä iskulla oli kaikkea 10-71 mm välillä.

5.3.4 PDA-mittaustulokset

Koepaalutukset suoritettiin 18.4 ja 19.4, ja ensimmäiset PDA-mittaukset suoritettiin 19.4 ja 20.4 yhteensä 21 koepaalulle. Paalut olivat siis olleet maassa 0-1 päivää mittaushetkellä. Kohteessa tehtiin myös CAPWAP-analyysi yhteen paaluun per talonpohja. Taulukossa 5.8 esitellyt mittaustulokset ensimmäiselle koepaalutukselle. Liitteessä 11 muuttaman esimerkkikoepaaluun PDA-mittausten iskuaaltokuvaajat ja liitteessä 12 CAPWAP-analyysin tulokset.

Taulukko 5.8 Koekuormitusten tulokset 18-19.4.2018. (Inspecta. 2018.)

Paalu		Upotus		Koe		Loppulyönnit		Koekuormitusisku		Kestävyy
Numero	LE [m]	LP[m]	pvm	pvm	H[m]	s/10 [mm]	EMX [kNm]	DMX [mm]	RMX [kN]	
3	5,0	3,7	17.4.	18.4.	0,30	17	23,2	15	2072	
11	6,4	5,0	17.4.	18.4.	0,30	16	21,4	12	2543	
42	4,6	3,3	17.4.	18.4.	0,30	17	17,9	9	2724	
64	4,5	3,2	17.4.	18.4.	0,30	11	12,2	9	2026	
72	4,1	3,0	18.4.	19.4.	0,30	16	27,8	18	1836	
88	16,3	14,9	17.4.	18.4.	0,25	55	37,3	27	1759	
102	10,4	10,2	18.4.	18.4.	0,25	31	30,6	21	1642	
103	8,6	7,4	17.4.	18.4.	0,30	17	25,8	12	2440	
112	6,5	5,0	19.4.	19.4.	0,30	45	25,2	16	1686	
115	10,4	10,0	18.4.	18.4.	0,25	52	14,8	9	2375	
142	4,4	3,0	18.4.	18.4.	0,30	13	30,2	22	1668	
202	9,5	7,9	19.4.	19.4.	0,25	71	43,2	34	1293	
208	6,7	5,0	19.4.	19.4.	0,25	69	20,6	17	1268	
222	6,6	5,0	18.4.	19.4.	0,30	67	21,6	17	1271	
252	4,6	3,4	18.4.	19.4.	0,25	15	12,6	9	2196	
270	5,0	3,8	18.4.	19.4.	0,30	17	32,5	17	2240	
274	6,2	4,9	18.4.	18.4.	0,30	15	11,0	6	2355	
286	10,0	9,4	18.4.	18.4.	0,30	16	30,7	20	1861	
328	6,7	5,3	18.4.	18.4.	0,30	15	19,6	9	2750	
333	5,1	4,0	18.4.	18.4.	0,30	17	10,5	8	2054	
338	6,0	4,6	18.4.	18.4.	0,25	10	19,7	12	2117	
							(Rc:m)mean		2008	
							(Rc:m)min		1268	

Raportissa todettiin, että staattinen vastus oli jokaisen paalun kohdalla vähintään kaksinkertainen paalun kuormaan nähden. Maaperä on tiukkaa, ja lyöntivastus nousi suuriksi jo paalujen ollessa vasta 3 metrin syvyydessä maanpinnasta. Näiden mittausten perusteella paalut voisivat olla huomattavasti lyhyempiä kuin suunnitellut. CAPWAP-analyysin perusteella paaluille tulisi vaippavastustakin jo lyhyen ajan jälkeen, 5-6 metrin pituisessa paalussa vaippavastusta olisi jo yli 700 kN. Taulukossa 5.9 esitetty CAPWAP-analyysin tulokset. Tämä tarkoittaa, että murtokuorma 1260 kN saadaan vaippavastuksella ja kärkivastuksella, kun lopetuslyönnit ovat 10 lyönnin sarjalla 50-60 millimetriä. Lopullisen päätöksen kuitenkin tekee kohteen vastaava pohjarakennesuunnittelija tai kohteen pohjarakenteiden asiantuntijavalvoja.

Taulukko 5.9 CAPWAP-analyysin tulokset. (Inspecta. 2018.)

Paalu	Upotus		Koe	CAPWAP			
Numero	LP[m]	pvm	pvm	Jc	SF [kN]	EB [kN]	RU [kN]
11	5,0	17.4.	18.4.	0,46	739,0	1841,0	2580
252	3,4	18.4.	19.4.	0,47	528,0	1672,0	2200

5.3.5 Perustamistavan muutokset

Suunnittelija päätti, että paalut tulisi lyödä pohjatutkimuksissa esiintyvän tiukan kerroksen läpi. Vaihtoehtoja tämän suorittamiseksi suunnittelija ehdotti suurempaa paalutyyppiä TB350a, joka kestää suurempia lyöntienergioita, ja tällöin voitaisiin myös vähentää paalumäärää. Toinen vaihtoehto oli esireiän tekemistä, mitä ei yleensä tehdä, kun siltti-kerros on pohjavedenpinnan yläpuolella. Kolmas vaihtoehto oli näiden kahden yhdistelmää. Myös teräspuutkipaalun käyttö olisi mahdollista, tosin suuremmat kustannukset. CFA-paalu, eli kaivinpaalua, harkittiin myös. Mikäli paalutus ei onnistu suunnitellusti, olisi syvätiivistys massanvaihdolle ja rakennusten perustaminen yhtenäisele pohjalaatalle mahdollisuus. Syvätiivistyksen tapauksessa tulisi painumia, mutta ne tulisivat tasaisesti. Tärinävaikutusta joutuisi tutkimaan enemmän.

Urakoitsija totesi, ettei suurempi TB350a-paalu poistaisi ongelmaa, sillä vaikka sitä voi lyödä kovempaa, tiukassa maaperässä suurempi paalu tunkeutuu heikommin tiukan kerroksen läpi. Esireikien teko on mahdollista, joskin sekin tuottaa lisäkustannuksia. Paalutyyppin vaihtaminen esimerkiksi teräsputkipaaluun läpimitalla RR170/12 lisäisi myös kustannuksia huomattavasti. Vaihdoissa teräsputkipaaluuihin olisi myös hyvä suorittaa koe-paalutus ja PDA-mittaukset uudestaan.

5.3.6 Pohdinta

Tässä kohteessa suunnittelija päätti lyödä paalut syvemmälle, vaikka lyhyilläkin paaluilla saatiin suuret kantavuudet. Maaperä on niin tiukkaa, että se joudutaan läpäisemään rautapiikillä 8 metrin matkalta ennen paalun asennusta pisteeseen. Työmaalla ei siis pystytty hyödyntämään lyhyempää paalupituutta, vaikka PDA-mittaus toimi laadunvarmistuksena, kaikissa paaluissa saatiin helposti mobilisoitua tarvittava vastus. Jo lyötyjä paaluja ei tarvittu lyödä syvempään. Ratkaisu lyödä paalut syvempään tuntuu olevan otettu hyvin varman päälle, sillä kantavuudet olivat kaksinkertaiset paalukuormaan nähden. Tämä työmaa on hyvä esimerkki siitä, että suunnittelijoilla on paljon vastuuta päätöksissä. Toinen suunnittelija olisi tosin voinut päättää eri tavalla. Tämä paalutustyö suoritetaan vasta diplomityön jälkeen, joten lopullisia suunnitelmia ja toteutunutta paalumäärää ja loppulyöntikriteerejä ei tässä vaiheessa tiedetä.

Taulukon mukaiset loppulyöntikriteerit:

18-19 mm/10 iskua

PDA-mittaukseen perustuvat loppulyöntikriteerit:

50-60 mm/10 iskua

ei otettu käyttöön

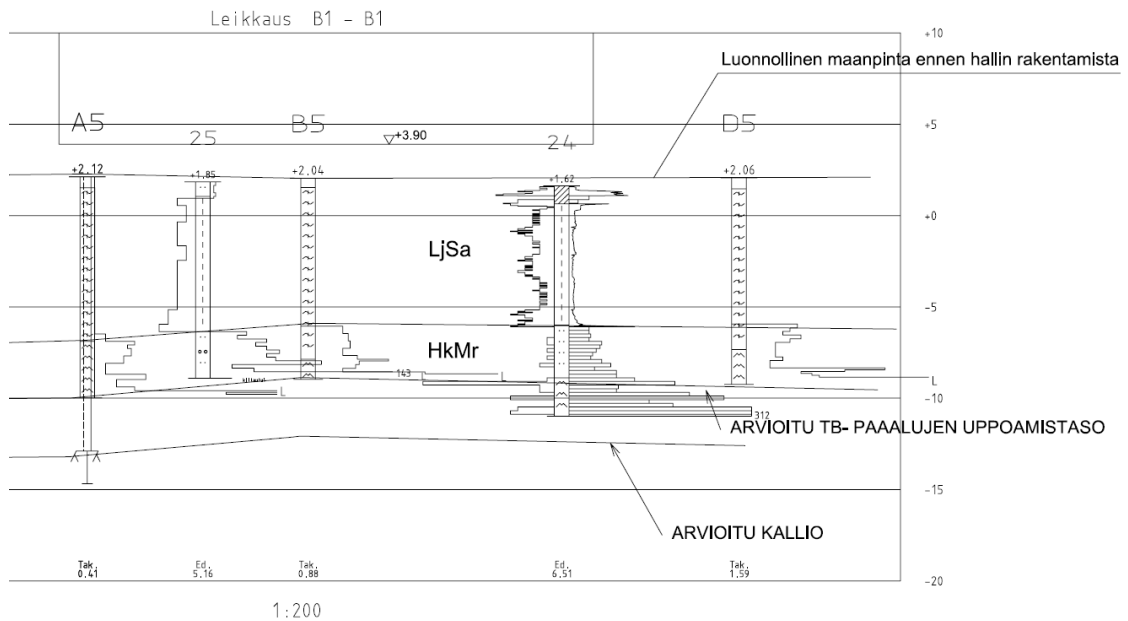
5.4 Espoon Piruetti

5.4.1 Työmaan kuvaus

Asunto Oy Espoon Piruetti on SRV Rakennus Oy:n rakentama 16-kerroksinen asuinkerrostalokohde. Rakennuskohde sijaitsee Espoossa, osoite Majuritie 1, 02600 Espoo. YIT Rakennus Oy suoritti lyöntipaalutuksen kohteessa kesällä 2017. Tontilla on aikaisemmin ollut hallirakennus, joka on purettu. Tämän jäljeltä maassa on vanhoja paaluja. Paalutus tehtiin aivan kiinni viereiseen myös rakenteilla olevaan taloon.

5.4.2 Pohjaolosuhteet

Pohjaolosuhteet perustuvat Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy:n laatimaan pohjatutkimus- ja perustustapasuunnitelmaan (22.6.2016). Pohjatutkimuksia on käytettävissä pääosin vuodelta 1974 ja tämän lisäksi Espoon kaupungin 2000-luvulla teettämiä pohjatutkimuksia lähialueilta. Mittausmenetelminä on käytetty 12 painokairausta, 3 heijarikairausta, 2 siipikairausta ja 1 porakonekairaus. Kohteesta on myös otettu yhdestä pisteestä häiriintyneen maan näytteitä. Yhteensä työmaan lähistöltä on tehty noin 40 pohjatutkimusta. Kuvassa 5.10 on esitettyä poikkileikkaus B-B, josta voi nähdä paalujen arvioidun tunkeutumistason. Liitteestä 13 löytyy pohjatutkimuskartta, sekä liitteestä 14 pohjatutkimusleikkaukset.



Kuva 5.10 Leikkaus B-B, paalujen arvioitu tunkeutumistaso esitetty. (Kuva: Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy. 2016.)

Maaperä koostuu rakennetuista pintakerroksista, savesta ja liejusta, hiekasta ja moreenista. Savi/lieju -kerroksen paksuus on pohjatutkimusten mukaan 6-10 metriä, ja sen leikkaukslujuus 9-14 kN/m². Pehmeän kerroksen alla on 2-4 metrin paksuinen hiekkakerros. Hiekkakerros muuttuu alaspäin mentäessä tiiviiksi moreenikerrokseksi. Painokairaukset pysähtyivät noin 5 metriä savipinnan alapuolella. Kalliopintaa ei oltu todettu, sen arvioitiin olevan noin 3 metriä syvemmällä kuin kairauksen päättymistaso. Maaperä on kivinen. Maaperän todettiin olevan lievästi korrosoivaa, ja korroosion arvoksi käytettiin normaalia poikkeavaa 3 millimetriä.

Pohjatutkimuslaskelmissa esitettiin teräsbetonipaalujen käyttöä ja niiden asentamista kantavan moreenin varaan. Rakennuksen ulkopuolelle sijoittuviksi paaluiksi esitettiin käytettäväksi teräsputkipaaluja, maaperän heikon sivuvastuksen takia.

5.4.3 Paalutus

Paalutuksessa käytettiin teräsbetonipaaluja TB350a sekä lyötäviä teräsputkipaaluja RR220x12.5. Paalut varusteltiin kalliokärjillä. Kohteessa käytettiin paalutusohjetta PO-2011 sekä InfraRYL 2010 kohdan 13211 Teräsbetonipaalut mukaisesti. Osalle paaluista porattiin esireiät Auger-kairalla, jotta vähennettäisiin maan syrjäytymistä lähellä vieressä sijaitsevaa rakenteilla olevaa rakennusta.

Puristuskestävyyden mitoitusarvo $R_{d,max}$ teräsbetonipaaluille oli oltava vähintään 1100 kN/m². Kohteen luokitukset on esitelty taulukossa 5.10. Taulukossa 5.11 on esitetty Paalutuotelehti 2011 mukaiset loppulyönnit kyseiselle paalutyypille. Liitteessä 15 on esitetty Piruetin paalukartta.

Taulukko 5.10 Kohteen Espoon Piruetti luokitukset.

Seuraamusluokka	CC3
Vaativuusluokka	poikkeuksellisen vaativa
Geotekninen luokka	GL3
Paalutusluokka	PTL3

Taulukko 5.11 Lopetuslyönnit paalulle TB350a PO-2011 mukaisesti. (Paalutuotelehti 2011.)

PTL 3	Lyöntilaite	Paalupituus [m]						Pudotuskorkeus	Lyöntienergia
		Painuma [mm]							
	Kiihdytetty hydraulijärkäle 5t	5	10	20	30	40	50	H[m]	E[tm]
		18	18	17	17	17	17	0,6	3,00

PDA-mittauksia tehtiin 5 prosenttiin paaluista. Vaatimus mittaustuloksille paalujen keskimääräiselle puristuskestävyydelle on mittaajan raportin mukaisesti

$$(R_{c,m})_{mean} = 1100 \text{ kN} \times 1,5 \times 1,2 = 1980 \text{ kN}$$

ja vaatimus paalujen minimi puristuskestävyydelle on

$$(R_{c,m})_{min} = 1100 \text{ kN} \times 1,35 \times 1,2 = 1782 \text{ kN}$$

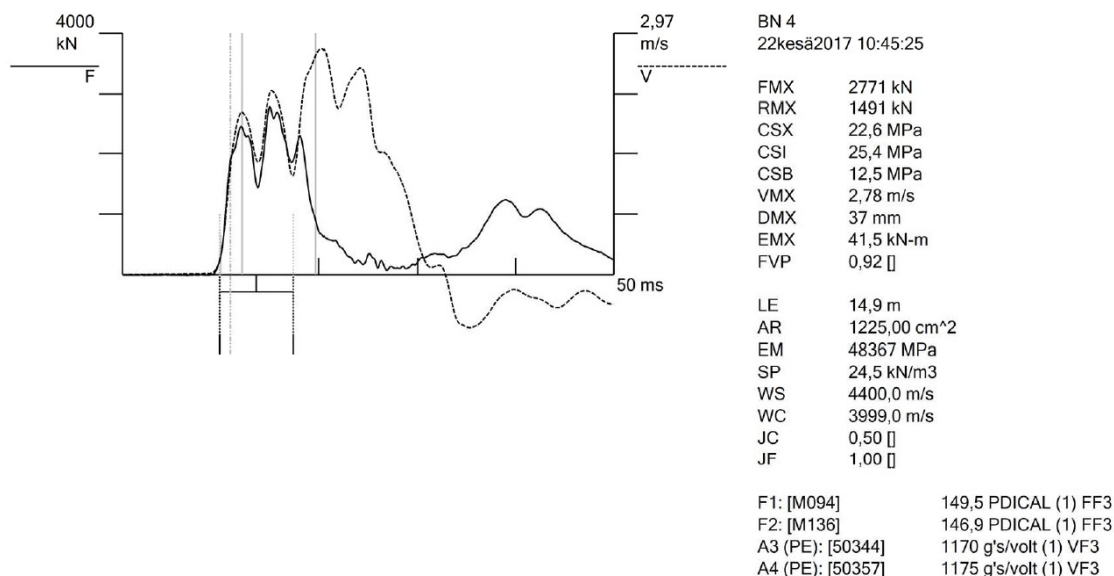
5.4.4 PDA-mittaustulokset

Kohteessa tehtiin PDA-mittauksia yhteensä neljä kertaa. Ensimmäisten PDA-mittaukset tehtiin 22.6.2017 ja tulokset on esitelty taulukossa 5.12. Liitteessä 16 on esitetty osa ensimmäisen PDA-mittauksen iskuaaltokuvaajista.

Taulukko 5.12 PDA-mittauksen 1. tulokset. (Inspecta. 2017.)

Paalu		Loppulyönnit	Koekuormitusisku				Kestävyys
Numero	LE [m]	s/10 [mm]	EMX [kNm]	s [mm]	DMX [mm]	c [mm]	RMX [kN]
15	12,4	7	41,7	-	24	24,0	2209
18	14,2	8	36,5	-	31	31,0	1783
23	14,9	5	41,5	2	37	35,0	1491
42	15,3	9	44,1	-	32	32,0	2085
(R _{c;m}) _{mean}							1892
(R _{c;m}) _{min}							1491

Vaatimukset keskimääräiselle- sekä minimi- puristuskestävyydelle eivät täyttyneet. Paalujen loppulyönnit olivat samaa kokoluokkaa kaikilla paaluilla, ne oltiin lyöty suurinpiirtein yhtä tiukkaan. Paalut olivat silti pysähtyneet eri kerroksiin, osa paaluista jäi ylempään kerrokseen, ja tässä kerroksessa paaluilla oli suurempi jousto. Jousto oli suurimmillaan, yli 35 millimetriä, kun vasara pudotettiin maksimikorkeudesta, eli loppulyöntien aikana joustoa oli noin 15 millimetriä. PDA-raportissa arvioitiin, että mikäli muut paalut lyödään samaan tiukkuuteen, niin voidaan olettaa vastaava geotekninen kestävyys kuin mitatuilla paaluilla. Eli loppulyöntiohjeet olivat, että loppulyöntisarjan aikana painuma tulisi olla alle 10 millimetriä, pudotuskorkeus 0,4 metriä ja jousto alle 15 millimetriä. Raportissa ehdotettiin myös, että paalu 23 jälkilyödään alle 15 millimetrin joustoon, kuvassa 5.11 paalun 23 mittaustuloksesta. Paalut 23 ja 42 päätettiin jälkilyödä.



Kuva 5.11 Paalun 23 voima-nopeuskäyrä. DMX:n arvo, eli suurin siirtymä anturin kohdalla, on suuri. (Kuva: Inspecta. 2017.)

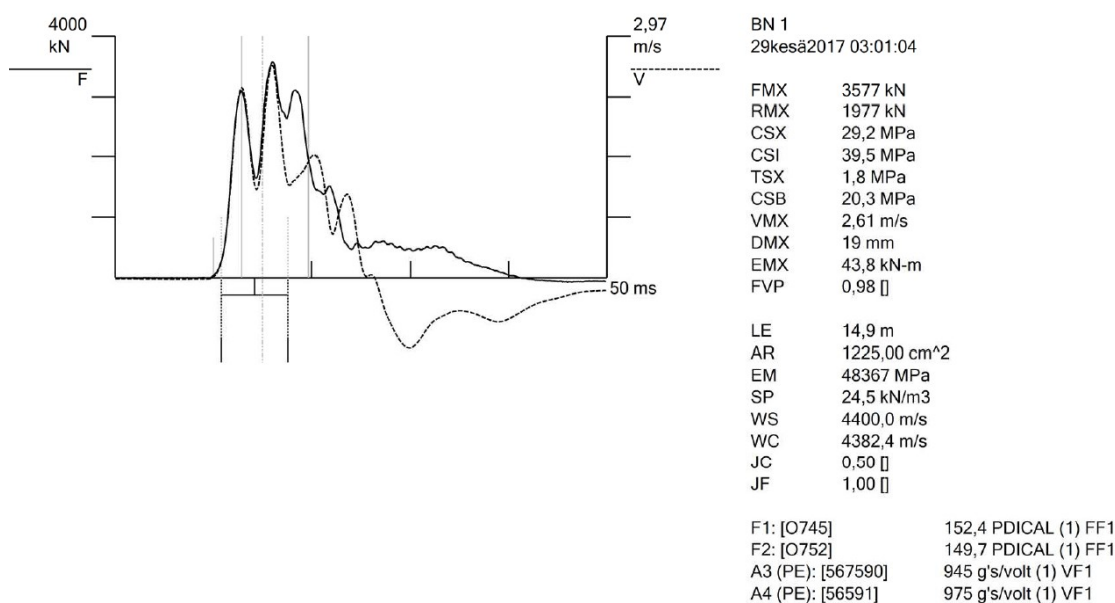
Paalun 23 jousto saadaan, kuten yhtälössä [aikaisempi numero], s_{max} on DMX:n arvo, s_p taulukosta 3;

$$c = s_{max} - s_p = 37 \text{ mm} - 2 \text{ mm} = 35 \text{ mm}$$

PDA-mittaukset tehtiin seuraavan kerran viikkoa myöhemmin 29.6.2017, tulokset esitetynä taulukossa 5.13. Tällä mittaukskerralla mitattiin kaksi paalua, numerot 23 ja 42, jotka oltiin päätetty jälkilyödä syvempään maakerrokseen. Mittauksissa käytettiin maksimipudotuskorkeutta, ja tuloksista pystyttiin huomata, että paalujen geotekninen kestävyys oli parantunut yli 30 % viikossa. Kuvassa 5.11 on esitetty paalun 23 päivitetty PDA-tulokset, paalun kantavuus on kasvanut ja jousto pienentynyt. Mittaajan raportissa todettiin, että tämä johtuu osittain vaippavastuksen kehittymisestä paalun alaosalla ja osittain myös huokospaineen laskusta paalun kärjen alapuolella, joka tarkoittaa, että maan jousto vähenee huomattavasti, ja täten myös karkivastus paranee. Raportissa todettiin myös, että voidaan edellisessä raportissa todettujen loppulyöntikriteerien mukaan, sillä paalun kantavuus nousee selkeästi ajan kuluessa, vaikka geotekninen kestävyys olisi heti lyönnin jälkeen alle sallitun.

Taulukko 5.13 PDA-mittauksen 2. tulokset. Res-pääte paalunumeron jälkeen osoittaa uusimmat tulokset. (Inspecta. 2017.)

Paalu Numero	LE [m]	Loppulyönnit s/10 [mm]	Koekuormitusisku				Kestävyys RMX [kN]
			EMX [kNm]	s [mm]	DMX [mm]	c [mm]	
23	14,9	5	41,5	2	37	35,0	1491
23res			43,8	-	19	19,0	1977
42	15,3	9	44,1	-	32	32,0	2085
42res			45,9	-	21	21,0	2865



Kuva 5.11 Paalun 23 tulokset uudelleenmitattuna 29.6.2017. (Kuva: Inspecta. 2017.).

Kolmas PDA-mittauskerta oli 27.7.2017 ja tällöin mitattiin viisi paalua, tulokset taulukossa 5.14. Koekuormituksessa käytettiin pudotuskorkeutta 0,8-1,2 m. Kaikki paalut saavuttivat vaaditun kantavuuden. Tuloksista voidaan taas nähdä, että kun jousto on suuri, on paalujen geotekninen kestävyys huomattavasti pienempi. Raportissa todettiin, että loppulyöntiehto pätee edelleen. Tulokset eivät olleet riippuvaisia vaimennuskertoimen valinnasta, esimerkiksi paalun P262 vastuksen vaihtelu vaimennuskertoimilla 0,6-0,8 oli 1712-1784 kN.

Taulukko 5.14 PDA-mittauksen 3. tulokset. (Inspecta. 2017.)

Numero	Paalu	LE [m]	Loppulyönti s/10 [mm]	Koekuormitusisku		Kestävyys RMX [kN]
				EMX [kNm]	DMX [mm]	
P193		14,8	<10	36,0	16	3407
P262		14,9	<10	46,7	33	1830
P332		16,0	<10	44,2	26	2109
P335		14,9	<10	49,9	29	2090
P344		14,9	<10	31,1	17	3011
(Rc;m)mean						2489
(Rc;m)min						1830

Viimeisellä teräsbetonipaalujen PDA-mittauskerta oli 3.8.2018, jolloin mitattiin kantavuus seitsemästä paalusta, tulokset esitetty taulukossa 5.15. Myös tällä kertaa kaikille paaluille saatiin siirrettyä tarpeeksi suuri staattinen vastus geoteknisen puristuskestävyyden nähdessä. Tälläkään kertaa tulokset eivät olleet riippuvaisia vaimennuskertoimen valinnasta. Paaluista oli taas huomattavissa, että mitä suurempi jousto, sitä pienempi geotekninen kestävyys. Loppulyöntiehto säilytettiin entisellään.

Taulukko 5.15 PDA-mittausten viimeiset tulokset. (Inspecta. 2017.)

Numero	Paalu		Loppulyöntit s/10 [mm]	Koekuormitusisku		Kestävyys RMX [kN]
	LE [m]			EMX [kNm]	DMX [mm]	
P108	15,1		<10	34,6	15	2289
P158	15,9		<10	50,1	20	2221
P174	14,4		<10	50,4	22	2316
P207	14,6		<10	42,6	18	2746
P223	15,5		<10	45,5	16	3715
P245	14,9		<10	48,0	19	2628
P268	16,0		<10	52,7	18	2677
					(Rc;m)mean	2656
					(Rc;m)min	2221

5.4.5 Pohdinta

Tämän työmaan PDA-mittaustulosten perusteella voidaan selkeästi huomata jouston vaikutus kantavuuteen. Vaikka painuma oli pieni, se ei välttämättä tarkoita suurta geoteknistä kestävyyttä, mikäli jousto on suuri. Työmaalla sai huomata, että vaikka paalut olivat tiiviissä kerroksessa, ja niihin lyötiin tuhansia iskuja, jousto oli suuri ja kantavuus ei riittävä. Paalujen lyöntiä jouduttiin siis jatkamaan, vaikka painuma oli taulukkojen mukaan tarpeeksi pieni. Paalut menivät 3-4 metriä syvemmälle kuin mitä pohjatutkimuksissa oli arvioitu. Jousto väheni vasta kun paalu ohitti tiiviin kerroksen, ja upposi hetken paremmin. Tämän jälkeen paalu pysähtyi paljon selkeämmin, eikä niin sanotusti ”pomppinut” enää, ja tarvittava kantavuus saatiin. Putkipaalut eivät samalla tavalla pysähtyneet aiemman kerrokseen, vaan ne saatiin suoraan lyötyä oikeaan tasoon, ja niiden perusteella myös oli helpompi arvioida lyöntipaalujen todelliset tavoitetasot.

Taulukon mukaiset loppulyöntikriteerit:

17-18 mm/10 iskua

PDA-mittaukseen perustuvat loppulyöntikriteerit:

<15 mm/10 iskua

6 Tulosten analysointi ja vertailu

6.1 Tapaustutkimusten vertailu

Tässä työssä käsitellyt työmaat on yritetty valita sen mukaan, että ne edustaisivat PDA-mittauksen loppulyöntikriteerien hyödyntämistä mahdollisimman hyvin. Taulukossa 6.1 on esitelty tiivistelmä työmaiden loppulyöntikriteereistä. Kun mahdollisia työmaita käytiin läpi työtä varten, pystyi huomaamaan, että n. 70 % tapauksista, jossa loppulyöntikriteereitä on säädelty, on pystytty keventämään ehtoja muutamalla millillä. Veturitie otettiin esimerkiksi kuvaamaan tällaista tyypillistä työmaata, eli käytännössä paaluja ei tarvitse lyödä niin syvään moreeniin pehmeän kerroksen jälkeen, kun mitä pohjatutkimuksissa on arvioitu.

Taulukko 6.1 Loppulyöntikriteerit työmailla paalutusohjeen mukaisesti sekä PDA-mittauksen avulla uudelleen määritellyt loppulyöntikriteerit.

Kohde	Loppulyöntikriteerit [mm/10 iskua]		Maaperä
	PO-2011	PDA	
Veturitie	17	20	täyttökerros, savikerros, lieju- ja turvekerrok- sia, 10-15 metrinen kitkamaakerros
K3 Wihuri	17-18	25	turvekerros, savikerros, silttikerros, näiden alla hiekkaa ja/tai moreenia
Hyvinkään Astreankatu	18-19	50-60	tiivis täyttö ylimpänä, alempana täyttö hieman löyhempi, siltistä hiekkaa, hiekkaa ja moreenia
Espoon Piruetti	17-18	<15	pehmeä kerros, hiekkakerros, joka muuttuu tiiviksi moreenikerrokseksi

Työmaita, joissa on tehty huomattavia kevennyksiä loppuehdoissa ei ole kovin montaa, mutta näistä on erittäin suuri hyöty kaikille osapuolille. K3 Wihuri toimi tästä esimerkkinä. Hyötyjä on monenlaisia: paaluja ei kuormiteta liikaa lyönnin aikana, kun saadaan loppulyöntiehdot sopiviksi, paalujen lyheneminen aiheuttaa paalukustannusten laskua, eteenkin mikäli jatkettavista paaluista voidaan siirtyä yksimittaisiin paaluihin, ja lisäksi lyöntityö nopeutuu. Tärkeintä on tässä vaiheessa tunnistaa maaperät, jossa tällaisia hyötyjä voidaan saavuttaa. Näiden tapaustutkimusten perusteella voidaan todeta, että suurimmat hyödyt saavutetaan työmailla, jossa maaperä on hyvinkin tiukkaa koko matkan paalua upottaessa. Työmailla, joissa paalu uppoaa pitkälti savessa, ja tämän jälkeen pysähtyy moreenikerrokseen, saadaan harvemmin niin selkeitä hyötyjä.

Hyvinkään Astreankadulla saatiin PDA-tulokset, jotka osoittivat, että paalujen kantavuus on vähintään kaksinkertainen vaadittuun kuormaan nähden. Kuitenkin suunnittelija päätti, että paalat lyödään syvemmälle. Tämä työmaa on hyvä esimerkki siitä, että suunnittelija ei välttämättä suoraan hyödynnä PDA-raportista saatua ehdotusta. Suunnittelija tekee aina lopullisen päätöksen, miten paalutus lopulta suoritetaan. Suunnitteluun vaikuttaa moni asia, ja toinen suunnittelija olisi voinut päätyä erilaiseen päätökseen. On tärkeää, että urakoitsijat ja suunnittelijat tekevät tiivistä yhteistyötä, tällöin pystytään hyödyntämään kaikkien osaaminen ja tekemään parhaat mahdolliset ratkaisut työmaalle.

Espoon Piruetin työmaalla oli myös erittäin tiukka maaperä, paalut joustivat paljon, vaikka loppulyöntiehdot oli saavutettu, joten paalut oli lyötävä syvempään. Haastattelussa Tommi Hakasen kertoi, että hän on myös ollut työmailla, joissa loppulyöntiehdot on saavutettu mutta ei olla saatu mobilisoitua minkäänlaisia kantavuuksia, tässäkin syynä huokosveden ylipaine. Huokosveden ylipaine paalun alapäässä aiheuttaa paalujen pomp-pimista, eikä täten anna riittäviä kantavuuksia. Vaikutukset vähenevät ja poistuvat ajan myötä, kun paalutuksen aiheuttama huokosveden ylipaine laskee, ja maa ympärillä asettuu.

6.2 PDA-mittauksen suorituksen optimointi

PDA-mittauksia suunnitellessa ja toteuttaessa on tärkeää, että paaluja jätetään eri syvyyksiin ja eri tiukkuuksiin, mikäli halutaan optimoida loppulyöntiehdot. Mikäli kaikki paalut on lyöty paalutusohjeen mukaisin loppulyöntiehdoin, on mahdotonta keventää loppulyöntiehtoja. Mikäli kaikki paalut on lyöty paalutusohjeen mukaisesti, voidaan raportissa ainoastaan todeta, että paalutusohjeessa määritellyt loppuehdot soveltuvat kohteeseen. Tämän takia on tärkeää, että työnjohtaja on seuraamassa paalutustyötä, ja neuvoo paalutuskoneen kuljettajaa, minkälaisiin painumiin ja syvyyksiin jättää paaluja, jotta näitä toivottavasti voitaisiin hyödyntää loppulyöntiehtojen optimoinnissa.

Tuloksista voidaan todeta, että mikäli on mahdollista, kannattaa mitata edes yksi jo mitattu paalu uudestaan, niin nähdään, minkälaista kantavuuden kehitystä paaluissa tapahtuu. Eteenkin paaluille, joille ei saada mobilisoitua tarpeeksi suurta, tai ainoastaan juuri ja juuri tarpeeksi suuri kantavuus, voi olla hyvä saada seurantamittaus. Tällöin paaluja ei välttämättä tarvisi lyödä tiukempaan. Mikäli mahdollista, olisi hyvä tehdä mittaus vasta 5-7 päivää varsinaisen lyöntityön jälkeen, tällöin maaperä on palautunut lyöntityön rasituksesta (Hakanen. 2018). Monesti työmailla tämä ei kuitenkaan ole mahdollista tilanpuutteen takia, paalutuskone ei pääse takaisin paalun luo, jonka on jo aikaisemmin lyönyt. Koepaalutuksen yhteydessä tämä on silti usein mahdollista, ja kannattaisi hyödyntää. Eteenkin hiekkamaissa, mutta myös moreenissa ja pienissä määrin savi- ja silttimaissa vaipan kapasiteetti kasvaa ajan myötä.

Keskusteltaessa Tommi Hakasen kanssa PDA-mittausten määrissä työmaalla, hän totesi, että PDA-mittaus olisi hyvä tehdä kaikkiin paaluihin, sillä se toimii hyvänä laadunvarmistuksena. Mittauksella saadaan helposti tieto paalun kantavuudesta ja ehjyydestä, ja täten voidaan helposti todeta paalutustyön onnistuminen suunnitelmien mukaisesti. Mitä enemmän mittauksia tehdään prosentuaalisesti tai määrällisesti, sitä alempia korrelaatio-kertoimia voidaan käyttää suunnittelussa, ja tällöin pystytään laskemaan suurempia kuormia paaluille. Mikäli paaluille lisäksi tehdään CAPWAP-analyysi, voidaan kertoimia pienentää entisestään, ja täten saadaan entistä suuremmat kuormat paaluille. CAPWAP-analyysillä saadaan myös tarkasti arvioitua paalun kärkivastus ja vaippavastus.

Urakoitsijalle on hyötyä siitä, että paalutustyönjohtajalla on tuntemusta PDA-mittauslaitteistosta ja PDA-mittauksista. Näin hän pystyy seuraamaan ja myös itsekin jossain määrin arvioimaan näytöltä näkyviä tuloksia mittauksen aikana. Paalutustyönjohtajan osaamisella on tässä suuri merkitys, että missä määrin voidaan yrittää hyödyntää loppulyöntiehtojen optimointia. Optimitalouksessa urakoitsijalla olisi itsellä asiantuntija, joka voisi suorittaa PDA-mittauksen kokonaisuudessaan. Tämä nopeuttaisi prosessia ja olisi myös kustannustehokkaampaa. Esimerkiksi Ruotsissa, jossa urakointi toimii hieman eri tavalla, urakoitsija hoitaa itse mittauksen kokonaisuudessaan (Riihimäki, Repo. 2018.)

Mikäli haluttaisiin mitata kaikki paalut jollakin työmaalla, olisi luultavasti järkevää kehittää mittaustaitteistoa. Jos kaikkiin paaluihin poraa reiät ja tekee mittauksen erikseen, työhön kuluu huomattavasti enemmän aikaa. Repo ja Riihimäki ehdottivat yhdeksi ratkaisuksi kiihtyvyys- ja venymäantureiden asennusta apupaaluun, ja täten saataisiin nopeammin kaikista paaluista tulokset. Tulokset eivät tällöin ole yhtä tarkat, signaali ei ole niin hyvälaatuinen, kun liikkuvia osia on enemmän. Apupaaluun asennettujen antureiden avulla voisi kuitenkin todeta paalun ehjyyden ja ehkä erittäin varovaisesti jotain kantavuudesta. Toinen vaihtoehto on asentaa anturit jatkopaalun yläpaaluun. Teräspuutkipaalujen tapauksessa on joskus asennettu anturit holkkijatkokseen, tämä ei kuitenkaan pysynyt niin hyvin paikallaan. (Repo, Riihimäki. 2018.) Ideaalia olisi, mikäli paalutuskoneeseen pystytettäisiin kehittämään laitteisto, joka mittaa paalun kantavuuden, mutta sellaista ei tiedettävästi ole kehitteillä ainakaan vielä.

6.3 Lyöntityössä säästettävä aika

Kun katsellaan paalujen kantavuutta kokonaislyöntimäärän funktiona, pystytään huomaamaan, ettei kantavuus ole niinkään riippuvainen kokonaislyöntimäärästä. Tämä tarkoittaa, että on melkoisen vaikea arvella, paljonko lyöntinopeudessa voisi säästää aikaa, kun lyöntimäärät per paalu vaihtelevat joka tapauksessa suhteellisen paljon. Voidaan todeta, että paalutuskoneen lyöntinopeuden ollessa 90 lyöntiä per minuutti, voidaan jonkin verran säästää aikaa, mikäli jätetään 10 iskun loppulyöntisarjoja pois. Kuvitellaan työmaa, jossa 200 paalua, ja kaikki voidaan lyödä 5 millimetriä kevyempään, ja oletetaan, että tämä tarkoittaa viittä loppulyöntisarjaa. Tällöin säästetty aika paalua kohden, loppulyöntisarjan ollessa 10 iskua, on

$$50 \text{ iskua} \times \frac{1 \text{ min}}{90 \text{ iskua}} = 0,56 \text{ min}$$

$$200 \text{ paalua} \times 0,56 \text{ min} = 111 \text{ min} \approx 2 \text{ tuntia}$$

Oletetaan, että maaperä on tiukahkoa, ja kaikkien paalujen lyöntiin menee keskimäärin 1000 iskua. Tällöin lyöntityön kokonaiskesto per paalu on

$$1000 \text{ iskua} \times \frac{1 \text{ min}}{90 \text{ iskua}} = 11,11 \text{ min}$$

ja koko lyöntityölle

$$200 \text{ paalua} \times 11,11 \text{ min} = 2222 \text{ min} \approx 37 \text{ tuntia}$$

Tässä laskennassa ei ole otettu huomioon koneen siirtoa, paalujen siirtelyä eikä muuta hukkaa työssä. Pelkässä lyöntityössä ajansäästö voisi olla näillä oletuksilla noin viiden prosentin luokkaa. Käytännössä tämän työn kesto olisi siis arviolta 3,25 työvuorua, ja päivitetyillä loppulyöntiehdoilla reilu 3 työvuorua. Pienillä työmailla selkeää hyötyä ei siis ole, mutta mikäli kyseessä on valtavat useamman tuhannen paalun työmaa, hyödyt ovat huomattavia. Jo kymmenkertaisella paalumäärällä ajallinen säästö olisi 2,5 työvuorua. Tämä on kuitenkin täysin maaperäkohtaista.

Työmailla, joilla säästetään esimerkiksi kolme metriä paalupituudessa, on luonnollisesti paljon suuremmat ajalliset hyödyt myös. Oletetaan, että paalu uppoaa tiukassa maaperässä noin 200 millimetriä 30 lyönnillä, eli 150 lyöntiä metrille. Oletetaan paalujen olevan 15-metrisiä, tällöin yhden paalun lyönti kestää jotakuinkin

$$150 \frac{\text{iskua}}{\text{m}} \times 15 \text{ m} \times \frac{1 \text{ min}}{90 \text{ iskua}} = 25 \text{ min}$$

ja koko lyöntityön kesto

$$200 \text{ paalua} \times 25 \text{ min} = 5000 \text{ min} \approx 83 \text{ tuntia}$$

Tällöin paalun lyheneminen 3 metriä säästäisi ajallisesti paalua kohden

$$3 \text{ m} \times \frac{150 \text{ iskua}}{\text{m}} \times \frac{1 \text{ min}}{90 \text{ iskua}} = 5 \text{ min}$$

ja koko lyöntityölle

$$200 \text{ paalua} \times 5 \text{ min} = 1000 \text{ min} \approx 17 \text{ tuntia}$$

eli kohteessa, jossa erittäin tiukka maaperä, ja jossa on saatu paalua lyhennettyä kolme metriä, voitaisiin säästää kahdensadan paalun lyönnissä lähes pari työvuoroa, alkuperäisen lasketun lyöntiajan ollessa reilu 10 työvuoroa. Rahallisesti 3 metrin lyhennys paaluissa on huomattava, mikäli oletetaan, että paalun lyöntihinta sisältäen työnhinnan on suurinpiirtein 30 euroa metrille. Mikäli saadaan jatkokset pois, kuten K3 Wihurin tapauksessa, säästetään lisäksi noin 100 euroa paalujatkosta kohden. Mikäli jatkos voidaan jättää pois paalusta, säästetään myös lyöntityössä aikaa, jatkopaalun asennus kestää kauemmin kuin yksimittaisen paalun asennus. Kahdensadan paalun työmaa on suhteellisen pieni työmaa, suurissa kohteissa voi olla tuhansia paaluja, ja tällöin myös säästöt moninkertaiset.

6.4 Suurimmat hyödyt työmaalle

Tommi Hakasen haastattelussa, hän totesi, että kaikista parhain kaikille rakentamisen osapuolille olisi, mikäli koepaalutus voitaisiin tehdä hyvissä ajoin ennen varsinaista paalutustyötä. Mikäli maaperä on niin suotuisa, että paaluja voitaisiin jopa vähentää, tämän olisi tapahduttava ennen kuin lopulliset rakennussuunnitelmat ovat valmiit, sillä anturoiden ja ylläolevien rakenteiden geometria tulee esteeksi. Paaluryhmissä voidaan mahdollisesti tehdä paalujen vähentämistä, mikäli yksittäisten paalujen kantavuus on tarpeeksi suuri. Käytännössä mikäli loppulyöntiehtoja kevennetään varsinaisen lyöntityön yhteydessä, ainoastaan paalutusurakoitsija hyötyy rahallisesti, mikäli kyseessä on kokonaishintaurakka. Kustannushyödyt saadaan kaikille osapuolille, mikäli suunnitelmia pystytään muuttamaan jo ennen rakentamisvaihetta. (Hakanen. 2018.)

Paalulaatat ovat toinen kohde, missä voisi mahdollisesti saada vähennettyä paalumäärää. Paalulaattakohteissa myös pohjaolosuhteet vaihtelevat usein, sillä paaluja on niin suurella alueella, ja tämänkin takia on tärkeä tehdä PDA-mittauksia. Teräspaalukohteissa voidaan mahdollisesti pienentää teräsputken kokoa, mutta teräsbetonikohteissa tämä ei ole yhtä

helppoa. (Repo, Riihimäki. 2018.) Kokoluokkia ei ole niin montaa, ja tämän lisäksi paalujen toimitusaika voi olla este. Paalujen toimitusaika oli tämän diplomityön tekohetkellä noin 2 kuukautta. Tämä tarkoittaa, että vaikka pystyttäisiin vaihtamaan paalut pienempiin, niitä joutuisi odottamaan kauan, ja tämä harvoin onnistuu työmailla. Tässä voi taas huomata koepaalutuksen tärkeyden, jos sen saa suoritettua hyvissä ajoin ennen varsinaista työtä, voidaan myös suunnitelmia muuttaa suuremmassa mittakaavassa,

Käytännössä eteenkin pienissä talokohteissa koepaalutusta ei voida tehdä paljoa ennen varsinaista paalutustyötä, eikä siitä usein ole hyötyäkään. Pienissä kohteissa ei saada suurta ajallista hyötyä ja rahallisetkin hyödyt ovat marginaalisia, vaikkakin loppulyöntiehtoja kevennettäisiin. Paalutehtaiden valmistusaika betonipaaluille on tällä hetkellä noin 2 kuukautta, ja mikäli paalumittaa saataisiin hyödynnettyä, tämä pitäisi siis tietää 2 kuukautta ennen varsinaista paaluttamista. Käytännössä se, että tehtäisiin koepaalutus huomattavasti ennen varsinaista paalutusta tarkoittaa, että maarakennustyöt on suoritettava valmiiksi jo ennen koepaalutusta, ja sitten työmaalla ei tapahdu mitään kahteen kuukauteen, kunnes varsinainen paalutus taas alkaa. Suurissa hankkeissa huomattavaa hyötyä taas voisi tulla kaikille hankkeen osapuolille. Suuriin hankkeisiin erillinen koepaalutus on monesti helpompi sovittaa yleisaikatauluun, eteenkin jos eri alueiden paalutuksia tehdään eri aikaan ja paalutus kestää muutenkin useamman kuukauden.

Urakoitsijalle on selkeää hyötyä etämittauksen käytöstä verrattuna tavanomaiseen mittaukseen. Etämittausmahdollisuus lisää joustavuutta työmaille, kun mittausajankohdat pystytään helpommin sopimaan mittaajan kanssa ja itse mittauskin on nopeaa. Päivässä voidaan mitata helposti monta kymmentä paalua. Eräällä työmaalla, jossa paalut olivat miltein rivissä, saatiin 12 paalua mitattua tunnin aikana. Mittauksen alkuvalmisteluihin kului vajaa tunti. Tietenkin mikäli paalut ovat kaukana toisistaan ja mahdollisesti hankalissa paikoissa, aikaa menee paalutuskoneen siirtoon. PDA-laitteiston kustannukset tulevat paalua kohden pienemmiksi, mitä enemmän paaluja mitataan, sillä laitteiston kustannus on vakio. Tämän takia mittauksia kannattaa teettää, aina kun nähdään, että niistä voisi olla hyötyä. Mittauksen tekemisellä ei häviä mitään, sillä vaikka loppulyöntikriteerejä ei saataisi kevennettyä, on mittaus silti laadunvarmistus, ja voidaan tarkistaa paalujen oikea asennus. Mikäli PDA-mittauksesta saadaan hyötyjä, ne voivat olla rahallisesti hyvinkin suuria jopa paalutuksen kokonaiskustannusta ajatellen.

7 Johtopäätökset

7.1 Yhteenveto ja päätelmät

Työn aiheena oli tarkistella, mitä etuja voidaan saada, kun tarkennetaan loppulyöntiehdot PDA-mittauksen perusteella. Tapaustutkimustyömaiden ja haastattelujen perusteella pystyttiin todeta, että kitkamaissa saadaan suurimmat hyödyt. Tässä työssä on tarkasteltu ainoastaan tukipaaluina toimivia paaluja eikä lainkaan kitkapaaluja, sillä kitkapaaluille ei samalla tavalla käytetä taulukoista löytyviä loppulyöntikriteerejä. Tukipaalut kehittävät silti myös vaippakitkaa, ja riippuen maaperästä vaippakitkaa voi kehittyä huomattavan paljon. Työmaat, jossa maaperässä on selkeästi huomattavissa paksuja kitkamaakerroksia, ovat ne, joissa luultavasti saadaan hyödynnettyä PDA-mittausta parhaiten loppulyöntiehtojen keventyessä.

Työmaat, joissa selkeä savikerros, jonka jälkeen paalut pysähtyvät tiukasti moreeniin, eivät luultavasti hyödy juurikaan PDA-mittauksista. Tällaisilla työmailla kantavuudet saavutetaan yleensä helposti ja paalua pysähtyy sen verran selvästi pehmeän kerroksen jälkeen, ettei loppulyöntivaihetta oikeastaan voi lyhentää. Mikäli työmaalla on paksu ja erittäin pehmeä savikerros, on kokemuksen perusteella hyvinkin mahdollista, että paaluun kohdistuu vetojännityksiä ja tällöin paalu voi katketa. Tämän takia on tärkeää, että aina mikäli mahdollista, paalua painetaan eikä lyödä pehmeässä maaperässä. Jos kuitenkin vaikuttaa siltä, että paalun on saattanut mennä poikki, eli se lähtee uppoamaan nopeasti syvemmälle tiukassakin maakerroksessa, paalun ehjyyden voi helposti tarkistaa PDA-mittauksella. Mikäli paalu on ainoastaan hieman vaurioitunut tai sille on kehittynyt uusi pää, on joskus mahdollista käyttää paalua, mikäli se kantaa, eli sille saadaan mobilisoitua tarvittava vastus.

Pienillä, noin sadan paalun tai alle, työmailla harvemmin saadaan ilmeisiä ajallisia ja rahallisia hyötyjä aikaan. Hieman isommilla työmailla, joissa useampia satoja tai jopa tuhansia paaluja, sekä ajalliset että rahalliset hyödyt voivat olla merkittäviä. Suurilla työmailla kannattaa siis useimmiten tehdä PDA-mittauksia ainakin koepaalutuksen yhteydessä. Mikäli paikka on hyvin selkeä paalutuksen kannalta, savikerros, jonka jälkeen paalu pysähtyy nopeasti, PDA-mittauksesta ei saada hyötyä luultavasti isollakaan työmaalla. Työmailla, joissa kitkamaakerroksia saadaan luultavammin suurin hyöty. Parhaassa tapauksessa voidaan lyhentää paaluja huomattavasti, lyhentää jatkopaalut yksimittaisiksi ja täten säästää jatkoksen hinta, vaihtaa kalliokärjet maakärkiin ja mahdollisesti jopa vähentää paalumäärää. Nämä kaikki tarkoittavat huomattavaa rahallista hyötyä. Ajallista hyötyä saadaan, kun paaluja ei tarvitse lyödä niin tiukkaan maaperään ja paalut mahdollisesti lyhenevät, ja täten voidaan säästää minuutteja yhden paalun lyöntityössä. Suurella työmaalla tämä tarkoittaa, että työ voi lyhentyä päivillä tai jopa viikoilla.

Kaiken kaikkiaan PDA-mittaus toimii erinomaisena laadunvarmistuskeinona lyöntipaalutuksessa, ja sen käyttöä tulisi lisätä. Nykyinen etämittausrakennuslaitteisto tekee mittauksesta helppoa, ja eteenkin koepaalutuksen yhteydessä olisi hyvä aina tehdä PDA-mittaus. Mikäli työmaalle ei ole määrätty erillistä koepaalutusta, työmaalla voidaan tehdä oma koepaalutus lyömällä paaluja esimerkiksi rakennuksen nurkkiin. Seuraavaksi voi heti suorittaa PDA-mittaus paaluille, ja täten saadaan mahdolliset loppulyöntikriteerien kevennykset heti käyttöön työmaalle. Tämän jälkeen kannattaa myös mitata muutama paalu, jotka on lyöty uusien loppulyöntikriteerien mukaisesti.

7.2 Ehdotuksia jatkotutkimuksille

Riittävät pohjatutkimukset ovat tärkeitä, kun suunnitellaan perustamistapaa. Monet seikat vaikuttavat paalujen käyttäytymiseen maaperässä. Riittämättömät pohjatutkimukset johtavat helposti hyvinkin suuriin lisäkuluihin rakennusalueella. Paalut on mahdollisesti suunniteltu liian lyhyiksi tai valittu liian pieni paalukoko, tai mahdollisesti alue ei edes sovellu paalutukseen. Voi olla, että joudutaan tekemään esireikiä paaluille tai vaihtamaan paalutyypin kokonaan työmaalla, esimerkiksi lyöntipaalusta porapaaluun. Pahimmassa tapauksessa perustamistapa joudutaan kokonaan suunnittelemaan uudestaan, ja se on hintavaa ja aikataululle hyvin haitallista.

PDA-mittauksen avulla pystytään huomaamaan paljon paalun käyttäytymisestä maaperässä ja todeta maaperän ominaisuuksia. Mittauksen avulla saadaan esimerkiksi selville, paljonko kantavuutta tulee kärjelle ja paljonko vaipalle. Huokosvedenpaine voidaan myös havaita, mikäli paalut ovat tiukassa maaperässä, mutta paaluilla ei ole kantavuutta. Kunnolliset pohjatutkimukset ja PDA-mittaus yhdessä antavat luotettavan kuvan maaperästä, ja näiden perusteella on helpompi arvioida perustamistavan soveltuvuus kohteeseen. Olisi siis tärkeää hyödyntää PDA-mittausta ja paalujen käyttäytymistä myös suunnittelussa pohjatutkimusten ohella.

Tässä työssä tutkittiin PDA-mittausta ainoastaan urakoitsijan näkökulmasta. Jatkotutkimuksen aiheeksi soveltuisi erittäin hyvin PDA-mittauksen hyödyntäminen suunnittelussa. Mikäli koepaalutukset tehtäisiin hyvissä ajoin, voitaisiin mittauksia käyttää soveltuvissa kohteissa paalumäärän optimointiin. Paaluja vähentyminen vaikuttaa rakennuskohteen kokonaiskustannuksiin selvästi. Lisäksi paalujen pituus voitaisiin arvioida tarkemmin, ja vältettäisiin yllätykset kesken rakennusvaiheen, jos paalut jäävät liian lyhyiksi tai ovat selkeästi liian pitkiksi suunniteltu. On tärkeää, että suunnittelijat tuntevat PDA-mittauksen ja osaavat hyödyntää sitä suunnittelussaan. Mikäli suunnittelussa ei ymmärretä täysin PDA-mittauksen hyötyjä, ei myöskään urakoitsija saa hyötyjä, mikäli suunnittelija ei muuta suunnitelmiaan PDA-mittauksen perusteella. Toinen tutkimuskohde on teräspaalujen käyttäytyminen maaperässä, sillä niiden vaippaominaisuudet ovat hyvin erilaiset kuin teräsbetonipaaluilla.

Kehityskohde laitevalmistajille on PDA-laitteisto, jonka avulla voitaisiin helposti suorittaa mittaus jokaisessa lyötävässä paalussa. Nykyinen menetelmä on helppo ja käyttäjäystävällinen, mutta mikäli lähdetään satoja paaluja mittaamaan, se on auttamattomasti hidas. Olisi hyvä, mikäli markkinoille tulisi joko lyöntipaalutuskone, jolla automaattinen PDA-mittaus rakennettuna lyöntivasarassa ja mahdollisesti apupaalussa. Toinen vaihtoehto on nykyistä laitteistoa muistuttava PDA-laitteisto, joka olisi entistä nopeampi kiinnittää paaluun.

Diplomityötä tehdessä huomattiin myös, että paalutuskoneiden tietokoneet eivät kirjaa lyöntiaikaa paaluille. Lyöntiajan kirjanpito auttaisi urakoitsijaa paremmin arvioimaan urakoiden kestot, mikäli paalutuskone automaattisesti kirjaisi myös asennuksen keston paaluille. Mikäli saataisiin kerättyä talteen tietoja eri maaperistä, kauanko näissä paalun upotus kestää, olisi helpompi arvioida oikein eri urakoiden kestot. Monessa koneessa on jo käyttöastetta laskevat mittarit, joten loikka jokaisen paalun asennuksen keston mittaukseen ei olisi niin suuri. Mikäli tällainen mittari saataisiin, se voisi myös antaa paalutuskoneen kuljettajalle ajantasaista tietoa, paljonko paaluja tulisi lyödä päivässä, jotta pysyttäisiin aikataulussa ynnä muita tietoja työn toteutuksen suunnitteluun.

Lähdeluettelo

Emeca Oy:n www-sivusto. < <http://www.emeca.fi/>>. Kuvat paalukärjistä ja paalujatkoksista. 11.3.2018.

FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy. 2017. Veturitie 1. toteutusvaihe Työselostus. 8.8.2017.

Finnmap Infra Oy. 2018. YIT Talo. Alustava perustamistapalausunto. Asokodit Astreankatu 25, Hyvinkää. 26.3.2018.

Finnmap Infra Oy. 2018. YIT Talo. Alustava perustamistapalausunto. LUMO Astreankatu 27, Hyvinkää. 22.3.2018.

Finnmap Infra Oy. 2018. Pohjatutkimuskartat. Astreankatu 25 ja 27, Hyvinkää.

Finnmap Infra Oy. 2018. Pohjatutkimusleikkaukset. Astreankatu 25 ja 27, Hyvinkää.

Finnmap Infra Oy. 2018. YIT Talo. Perustusten paalutus. Astreankatu 25 ja 27, Hyvinkää. 26.3.2018.

Fleming, K., Weltman, A., Randolph, M. & Elson, K. 2009. Piling engineering. 3. ed. London: Taylor & Francis.

Google Maps www-sivusto. <<https://www.google.com/maps>>. Kartta, josta näkyy pääkaupunkiseudulla sijaitsevien työmaiden sijainnit. 11.3.2018.

Hakanen, Tommi. 2018. YIT Infra Oy:n tekninen johtaja, diplomi-insinööri. Haastattelu Helsingissä 27.4.2018.

Insinööritoimisto EUROGEO Oy. 2016. K3 Wihurin koepaaluskartta. 12.12.2016.

Insinööritoimisto EUROGEO Oy. 2016. K3 Wihurin perustamistapasuositus. 12.12.2016.

Insinööritoimisto EUROGEO Oy. 2016. K3 Wihurin pohjatutkimuskartta. 14.10.2016.

Insinööritoimisto EUROGEO Oy. 2016. K3 Wihurin pohjatutkimusleikkaukset. 24.10.2016.

Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy. SRV Rakennus Oy, AS Oy Piruetti, Espoo. Pohjatutkimus- ja perustustapasuunnitelma. 22.6.2016.

Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy. SRV Rakennus Oy, AS Oy Piruetti, Espoo. Pohjatutkimusleikkaukset. 22.6.2016.

Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy. 2017. Veturitie pohjatutkimuskartta. 18.5.2017.

Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy. 2017. Veturitie pohjatutkimusleikkaukset. 18.5.2017.

Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy. 2017. Veturitie pohjaveden hallintauunnitelma. 17.5.2017.

Jardine, R. J., Standing, J. R., & Chow, F. C. 2006. Some observations of the effects of time on the capacity of piles driven in sand. *Géotechnique*, 56(4), 227-244. ISO 690

Junttan Oy:n www-sivusto. <<https://www.junttan.com/fi/>>. Junttan PMx20 Datasheet (PDF). 11.3.2018.

Jääskeläinen, R. 2009. Pohjarakennuksen perusteet. 2. p. [Tampere]: Tammertekniikka.

Kiiski, H. & Porkka, M. 2016. K3 Wihuri paalujen kantavuusvaatimukset kysymyksiä. Sähköpostiviestiketju Eurogeon Matti Porkan ja YIT:n Henri Kiiskin välillä 28.11.2016. Saatu sähköpostina YIT:n työnjohtaja H. Kiiskiltä 9.5.2018.

Kiwa Inspecta. 2016. Mittausraportti 161207TRi. Kohde: K3 Logistics. 8.12.2016.

Kiwa Inspecta. 2017. Mittausraportti 170126JKi. Kohde: K3 Wihuri. 27.1.2017.

Kiwa Inspecta. 2017. Mittausraportti 170214Tre-3 rev. Kohde: K3 Wihuri. 21.3.2017.

Kiwa Inspecta. 2017. Mittausraportti 170622TRi. Kohde: Espoon Piruetti. 22.6.2017.

Kiwa Inspecta. 2017. Mittausraportti 170629TRi. Kohde: Espoon Piruetti. 26.6.2017.

Kiwa Inspecta. 2017. Mittausraportti 170727TRe. Kohde: Espoon Piruetti. 28.7.2017.

Kiwa Inspecta. 2017. Mittausraportti 170803TRe. Kohde: Espoon Piruetti. 3.8.2017.

Kiwa Inspecta. 2018. Mittausraportti 180201TRe. Kohde: Veturitie. 1.2.2018.

Kiwa Inspecta. 2018. Mittausraportti 180312TRi. Kohde: Veturitie. 9.3.2018.

Kiwa Inspecta. 2018. Mittausraportti 180418TRi. Kohde: Lumo ja Aso. 20.4.2018.

Lehtonen, V. 2017. RIL 207-2017. Geotekninen suunnittelu: Eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluohje. [Päivitetty versio]. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

Liikennevirasto. 2014. Pohjarakenteiden suunnitteluohjeet: Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 5/2014. Verkkojulkaisu pdf. ISBN 978-952-255-407-9.

Liikennevirasto. 2016. Paalujen dynaaminen koekuormitus ja ehjyysmittaus. Liikenneviraston ohjeita 31/2016. Verkkojulkaisu pdf. ISBN 978-952-317-329-3.

Liikennevirasto. 2017. Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet 21.4.2017: Eurokoodin soveltamisohje – Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. Liikenneviraston ohjeita 13/2017. Verkkojulkaisu pdf. ISBN 978-952-317-387-3.

Likins, G. E. 1984. Field measurements and the pile driving analyzer “. Proceedings of the Second International Conference on the Application of Stress-Wave Theory on Piles, Stockholm, 298-305.

Nurmela, J. & Pihlajamäki, J. 2018. Astreankatu 25 ja 27 perustaminen. Sähköpostiviestiketju Finnmap Infra:n Jyrki Pihlajamäen ja YIT:n Jonne Nurmelan välillä 26.4.2018. Saatu sähköpostina YIT:n työnjohtaja H. Kiiskiltä 9.5.2018.

Olsson, C., Holm, G. 1993. Pålgrundläggning. AB Svensk Byggtjänst och Statens geotekniska institut. ISBN 91-7332-663-1.

Pfähle, E. A. 2014. Recommendations on Piling. German Geotechnical Society.

Pile Dynamics, Inc. PDA-8G and the PDA-s Program. Myyntiesite.

Päijät-Suunnittelu. 2018. Paalutusohjeet kohteelle Astreankatu 25 ja 27, Hyvinkää.

Rakennusteollisuus RT. 2005. Tuotelehti 2005 teräsbetoninen lyöntipaalu. Rakennusteollisuus RT. Betoniteollisuus ry.

Rakennusteollisuus RT. 2011. Tuotelehti PO-2011 mukaiseen paalutustyöhön. Rakennusteollisuus RT. Betoniteollisuus ry.

Rasi-Koskinen, H. 2014. Vaakasuuntaiset alustaluvut paaluperusteisissa silloissa. Diplomityö. Oulun yliopisto, teknillinen tiedekunta, ympäristötekniikka. Oulu. 176 s.

Repo, T & Riihimäki, T. 2018. Kiwa Inspectan tekniset asiantuntijat, diplomi-insinöörejä. Haastattelu. Tampereella 4.5.2018.

Riihimäki, T. 2011. Paalutusohje 2011, PO-2011: Osa 1: Suunnittelun perusteet, Osa 2: Paalutusohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Riihimäki, T. 2016. RIL 254-2016 Paalutusohje 2016: PO-2016. [Helsinki]: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

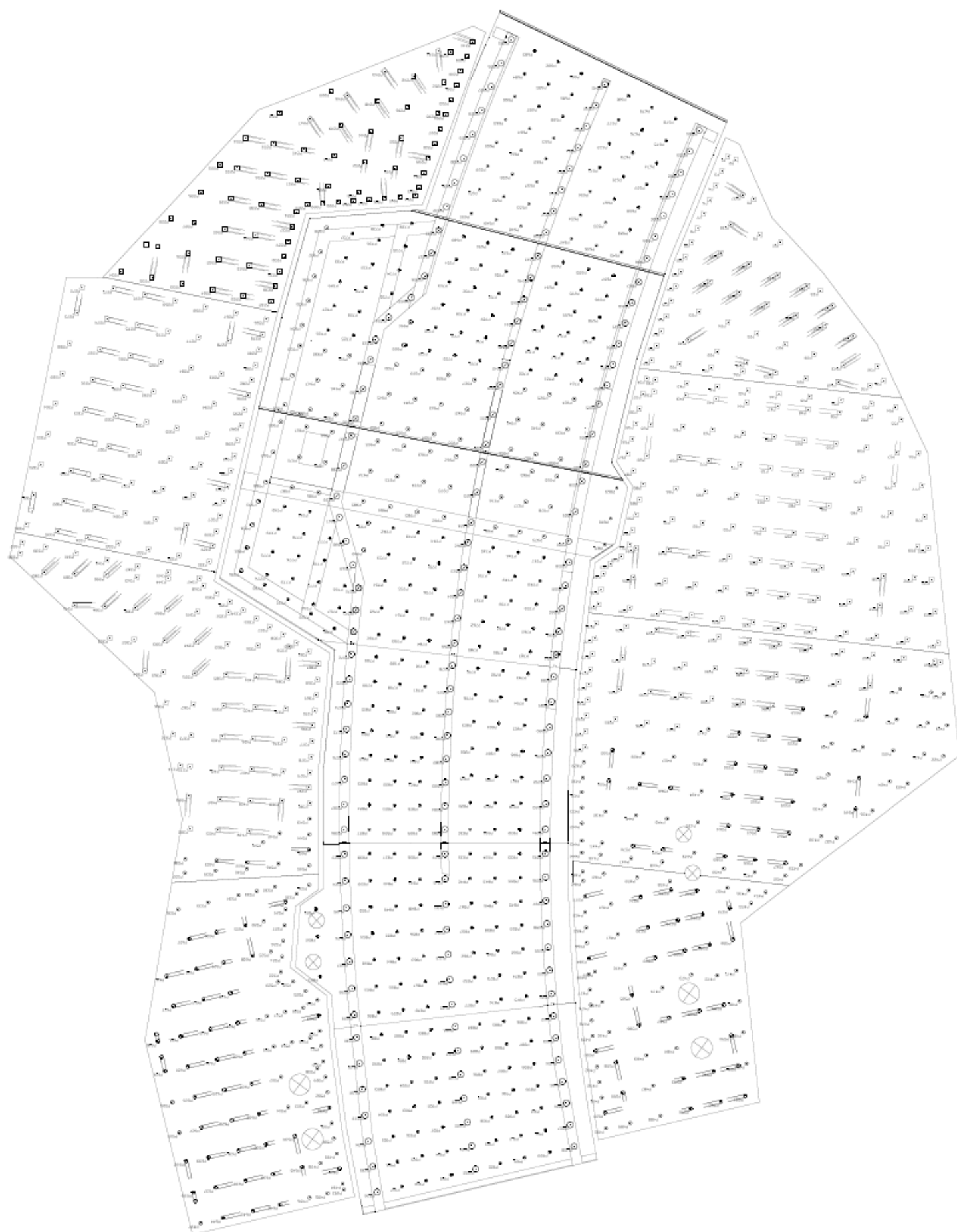
Seppälä, T. 1993. PDA-mittauksen suoritus ja tulkinta. Julkaisu 23. TTY, Tampereen teknillinen yliopisto, Geotekniikan laitos. Tampere. 44 s.

Suomen Rakennusinsinöörien liitto: Suomen geoteknillinen yhdistys. RIL 223-2005. Lyöntipaalutusohje LPO-2005: Teräsbetoni- ja puupaalut. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto : Suomen geoteknillinen yhdistys.

Tomlinson, M., & Woodward, J. 2014. Pile design and construction practice. CRC Press.

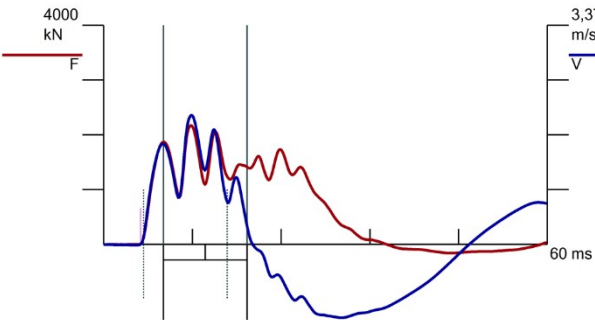
Liiteluettelo

- Liite 1. Veturitien pohjatutkimuskartta. Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy. 1 sivu.*
- Liite 2. Veturitien pohjatutkimusleikkaus 3-3. Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy. 1 sivu.*
- Liite 3. Veturitien paalukartta. GCG Suunnittelu ja tekniikka Oy. 1 sivu.*
- Liite 4. Veturitien koepaalujen iskuaaltokuvaajia. Inspecta Oy. 3 sivua.*
- Liite 5. K3 Wihurin pohjatutkimuskartta. Eurogeo Oy. 1 sivu.*
- Liite 6. Veturitien pohjatutkimusleikkaus M-M ja L-L. Eurogeo Oy. 1 sivu.*
- Liite 7. K3 Wihurin koepaalujen iskuaaltokuvaajia. Inspecta Oy:n mittausraportti. 3 sivua.*
- Liite 8. Hyvinkään Astreankadun ASO:n pohjatutkimuskartta. Finnmap Infra Oy. 1 sivu.*
- Liite 9. Hyvinkään Astreankadun Lumo:n pohjatutkimuskartta. Finnmap Infra Oy. 1 sivu.*
- Liite 10. Hyvinkään Astreankadun pohjatutkimusleikkaus A5. Finnmap Infra Oy. 1 sivu.*
- Liite 11. Hyvinkään Astreankadun koepaalujen iskuaaltokuvaajia. Inspecta Oy:n mittausraportti. 5 sivua.*
- Liite 12. Hyvinkään Astreankadun koepaalujen CAPWAP-analyysien tulokset. Inspecta Oy:n mittausraportti. 6 sivua.*
- Liite 13. Espoon Piruetin Pohjatutkimuskartta. Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy. 1 sivu.*
- Liite 14. Espoon Piruetin pohjatutkimusleikkaukset A1-A1, C1-C1 ja D1-D1. Insinööritoimisto Pohjatekniikka Oy. 3 sivua.*
- Liite 15. Espoon Piruetin paalukartta. Wise Group Finland Oy. 1 sivu.*
- Liite 16. Espoon Piruetin koepaalujen iskuaaltokuvaajia. Inspecta Oy:n mittausraportti. 4 sivua.*



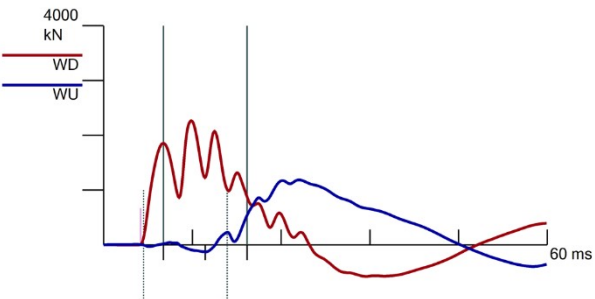
Pile Dynamics, Inc.
180201TRe Veturitie
P8
Junttan HHK 5A
PDA Operator: TRe

Pile Driving Analyzer® (PDA)
Version: 2017.22



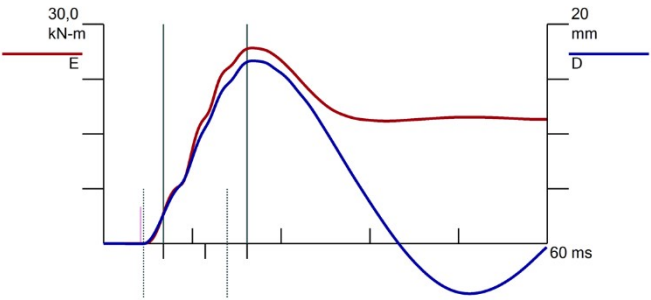
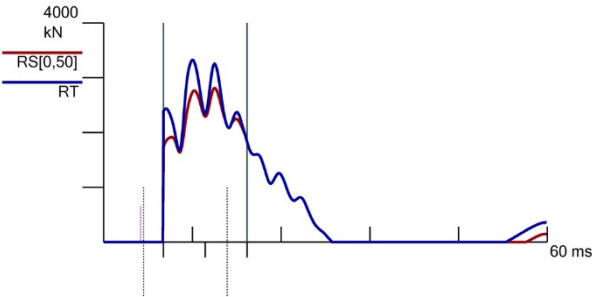
BN 2
01helmi2018 02:37:40

FMX	2170 kN
RMX	2811 kN
RX6	2722 kN
RX7	2633 kN
RX8	2545 kN
CSX	17,7 MPa
CSI	21,5 MPa
TSX	6,0 MPa
EMX	26,7 kN-m
VMX	1,98 m/s
DMX	17 mm
FVP	1,0



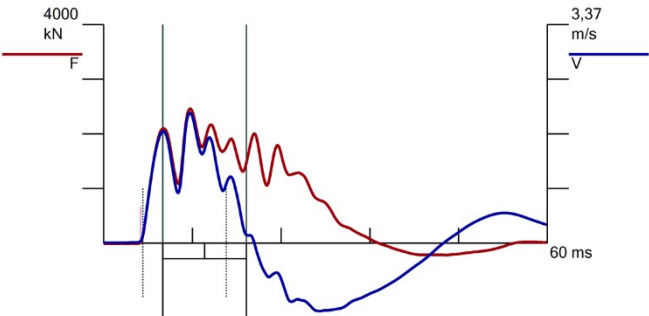
LE	21,4 m
AR	1225,00 cm^2
EM	36812 MPa
SP	25,0 kN/m3
WS	3800,0 m/s
WC	3787,6 m/s
JC	0,50
JF	1,00

F1: [0745]	152,4 PDICAL (1) FF5
F2: [0752]	149,7 PDICAL (1) FF5
A3 (PE): [567590]	945 g's/volt (1) VF5
A4 (PE): [56591]	975 g's/volt (1) VF5



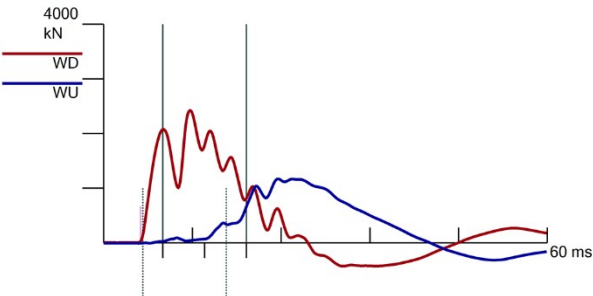
Pile Dynamics, Inc.
180201TRe Veturitie
P10
Junttan HHK 5A
PDA Operator: TRe

Pile Driving Analyzer ® (PDA)
Version: 2017.22



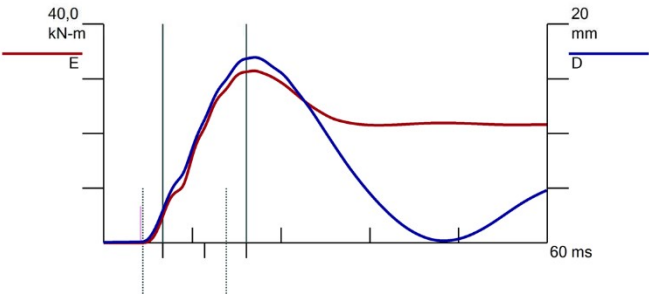
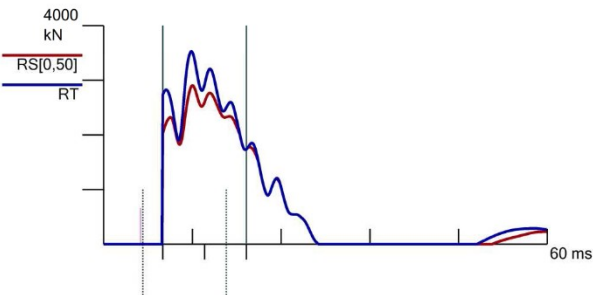
BN 2
01helmi2018 02:30:30

FMX 2460 kN
RMX 2905 kN
RX6 2786 kN
RX7 2670 kN
RX8 2554 kN
CSX 20,1 MPa
CSI 21,4 MPa
TSX 5,5 MPa
EMX 31,5 kN-m
VMX 2,01 m/s
DMX 17 mm
FVP 1,0



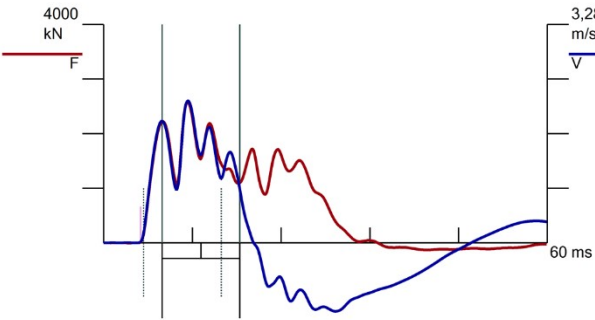
LE 21,4 m
AR 1225,00 cm^2
EM 36812 MPa
SP 25,0 kN/m3
WS 3800,0 m/s
WC 3787,6 m/s
JC 0,50
JF 1,00

F1: [0745] 152,4 PDICAL (1) FF5
F2: [0752] 149,7 PDICAL (1) FF5
A3 (PE): [567590] 945 g's/volt (1) VF5
A4 (PE): [56591] 975 g's/volt (1) VF5



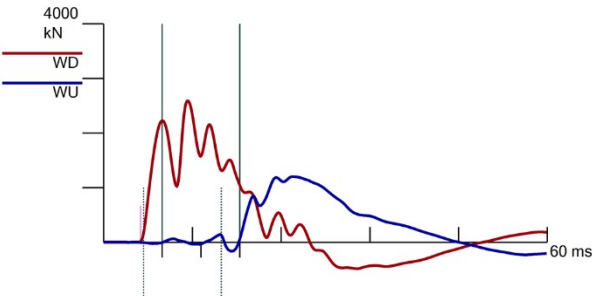
Pile Dynamics, Inc.
180201TRe Veturitie
P12
Junttan HHK 5A
PDA Operator: TRe

Pile Driving Analyzer® (PDA)
Version: 2017.22



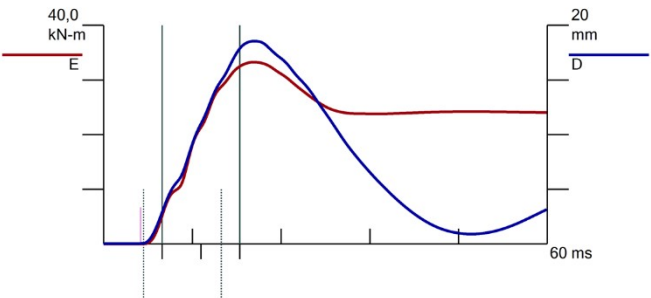
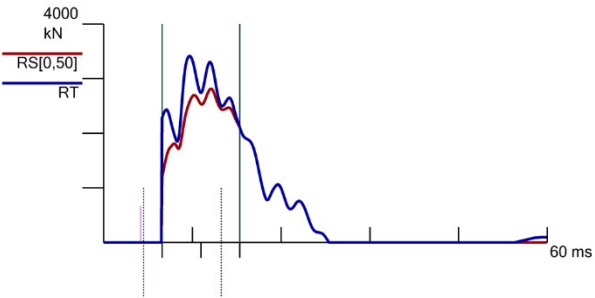
BN 3
01helmi2018 02:23:42

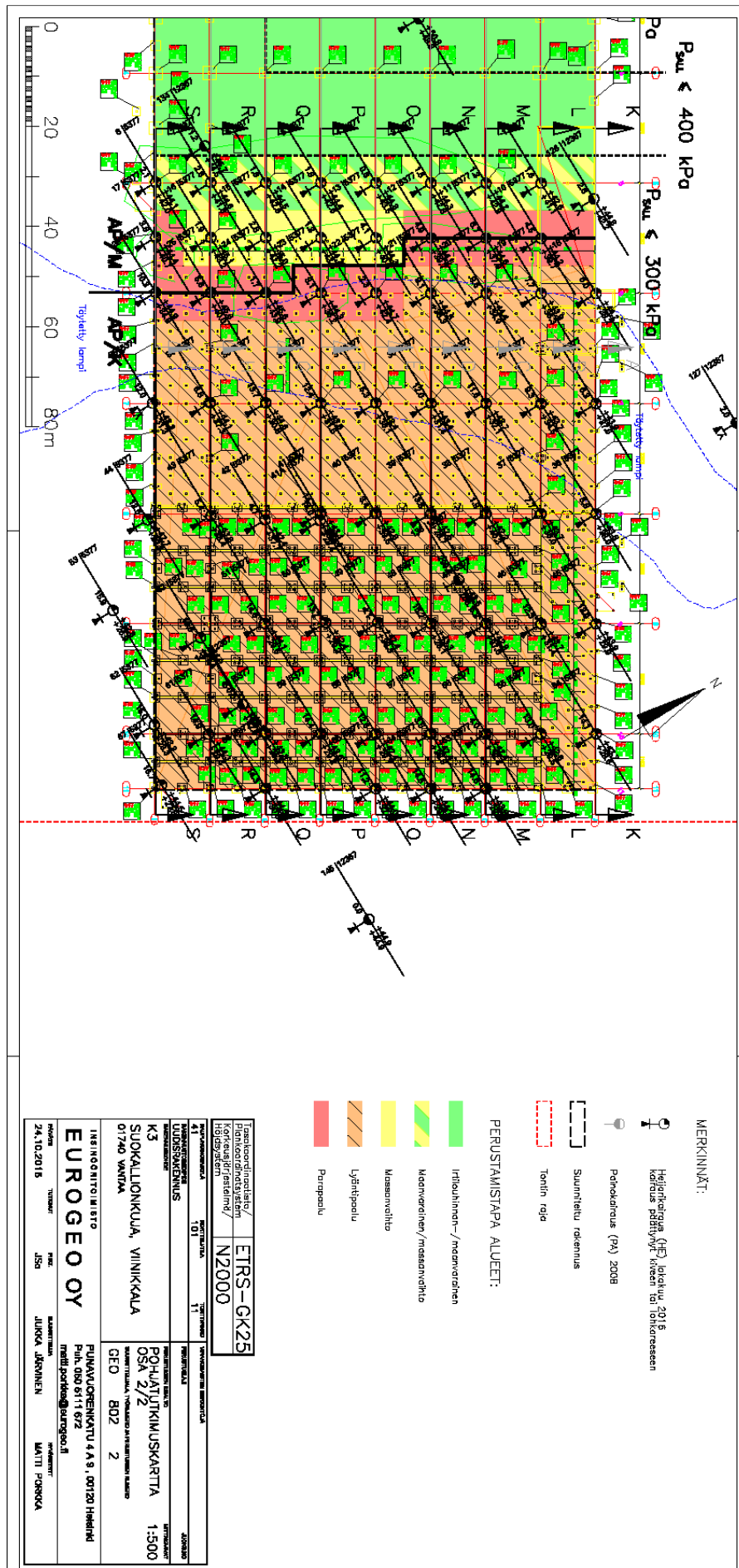
FMX	2582 kN
RMX	2813 kN
RX6	2722 kN
RX7	2631 kN
RX8	2546 kN
CSX	21,1 MPa
CSI	24,0 MPa
TSX	4,0 MPa
EMX	33,2 kN-m
VMX	2,14 m/s
DMX	19 mm
FVP	1,0

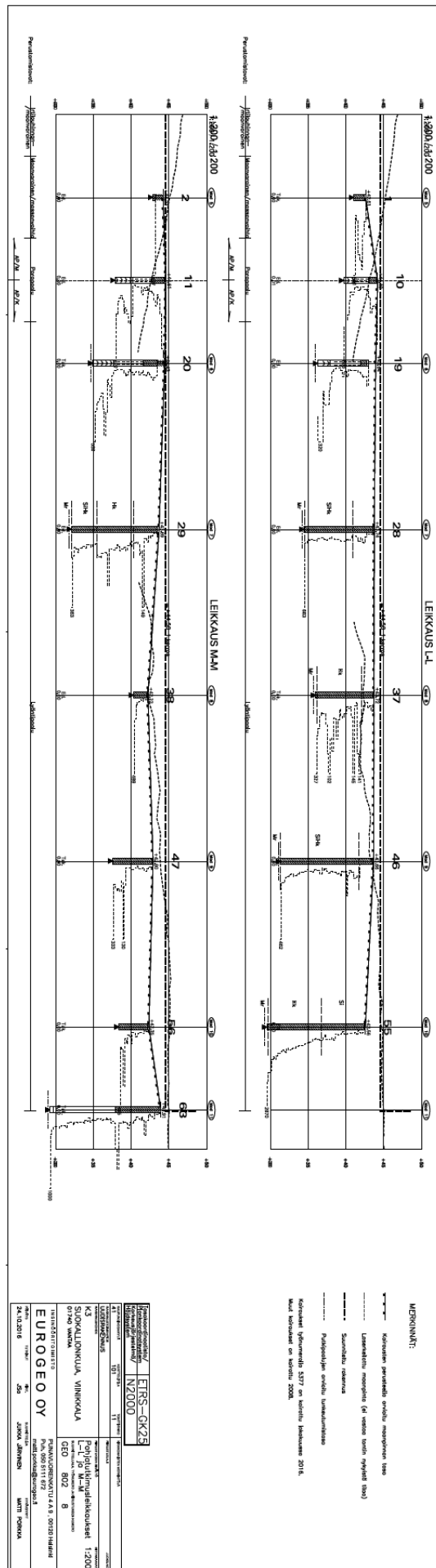


LE	21,0 m
AR	1225,00 cm^2
EM	38775 MPa
SP	25,0 kN/m3
WS	3900,0 m/s
WC	3981,8 m/s
JC	0,50
JF	1,00

F1: [0745]	152,4 PDICAL (1) FF5
F2: [0752]	149,7 PDICAL (1) FF5
A3 (PE): [567590]	945 g's/volt (1) VF5
A4 (PE): [56591]	975 g's/volt (1) VF5

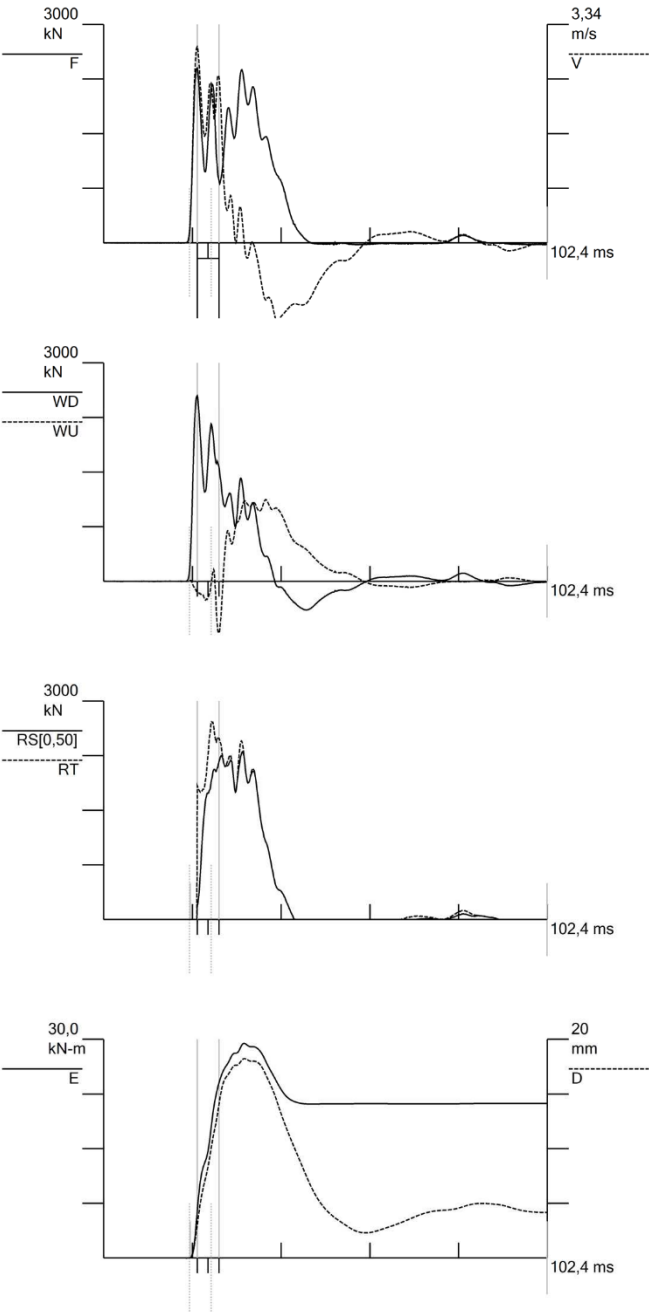






Pile Dynamics, Inc.
K3 Logistics
P85
Junttan HHK5A
PDA Operator: TRi

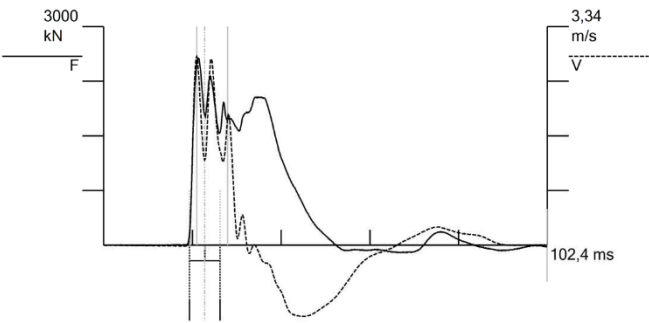
Pile Driving Analyzer® (PDA)
Version: 2016.16



BN 2	01loka2016 05:47:12
FMX	2402 kN
RMX	2303 kN
CSX	26,7 MPa
CSI	30,8 MPa
TSX	2,6 MPa
CSB	28,8 MPa
VMX	2,99 m/s
DMX	18 mm
EMX	29,4 kN-m
FVP	0,9 []
LE	9,3 m
AR	900,00 cm^2
EM	39973 MPa
SP	24,5 kN/m3
WS	4000,0 m/s
WC	3720,0 m/s
JC	0,50 []
JF	1,00 []
A1 (PE): [45903]	1165 g/s/volt (1) VF1
A2 (PE): [45906]	1130 g/s/volt (1) VF1
F1: [9123]	92,2 PDICAL (1) FF1
F2: [8610]	92,4 PDICAL (1) FF1

Pile Dynamics, Inc.
K3 Logistics
P272
Junttan HHK5A
PDA Operator: TRi

Pile Driving Analyzer® (PDA)
Version: 2016.16

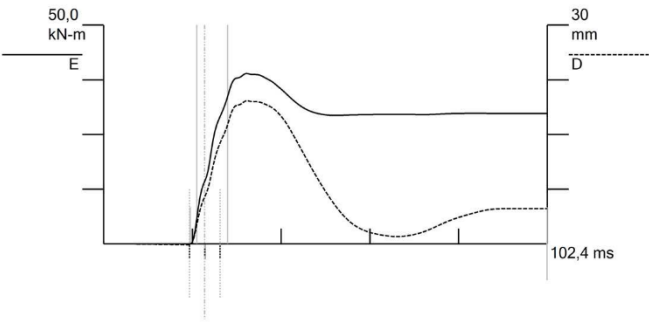
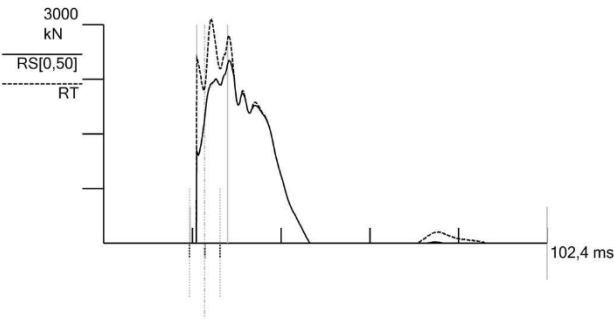
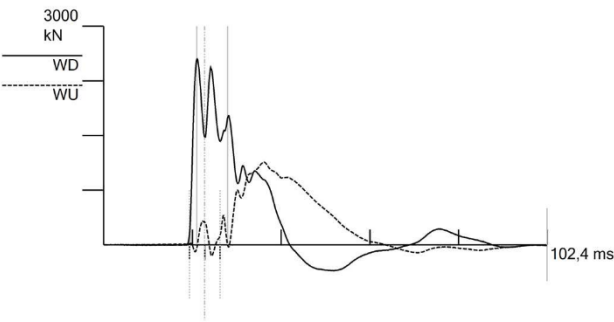


BN 3
01loka2016 05:56:45

FMX 2564 kN
RMX 2507 kN
CSX 28,5 MPa
CSI 28,5 MPa
TSX 3,3 MPa
CSB 29,8 MPa
VMX 2,88 m/s
DMX 20 mm
EMX 38,9 kN-m
FVP 1,0

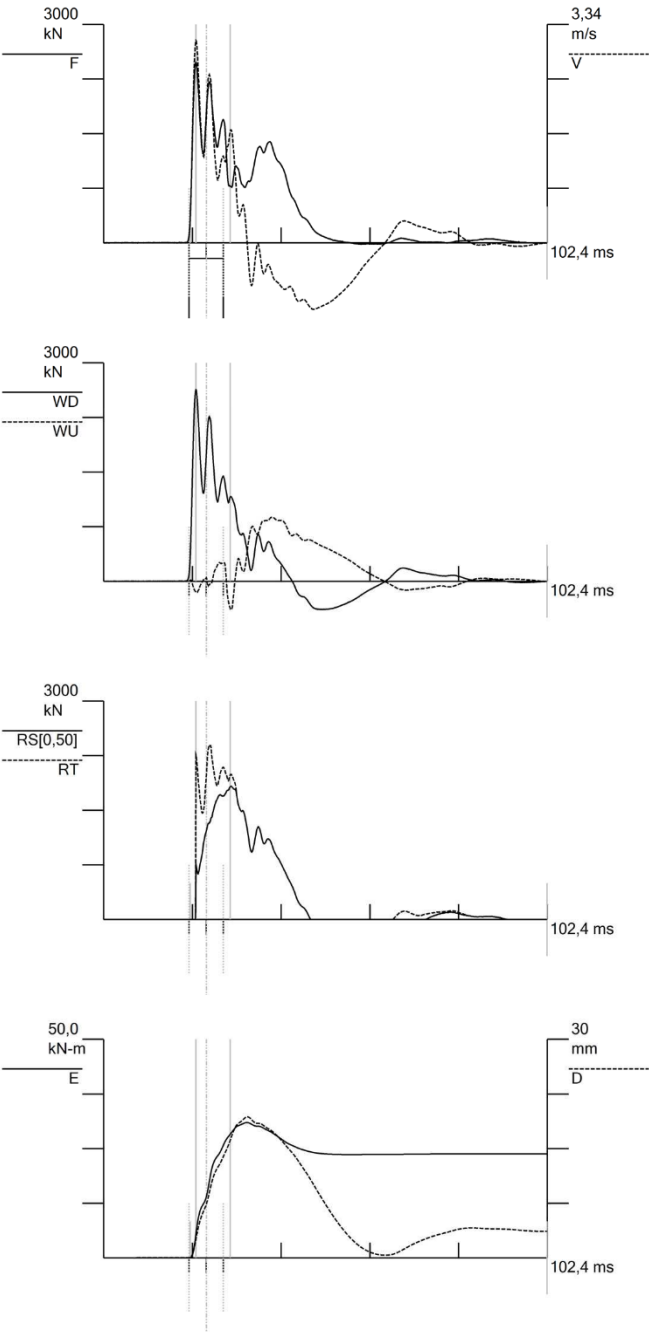
LE 12,7 m
AR 900,00 cm^2
EM 39973 MPa
SP 24,5 kN/m3
WS 4000,0 m/s
WC 3602,8 m/s
JC 0,50
JF 1,00

A1 (PE): [45903] 1165 g's/volt (1) VF1
A2 (PE): [45906] 1130 g's/volt (1) VF1
F2: [8610] 92,4 PDICAL (1) FF1

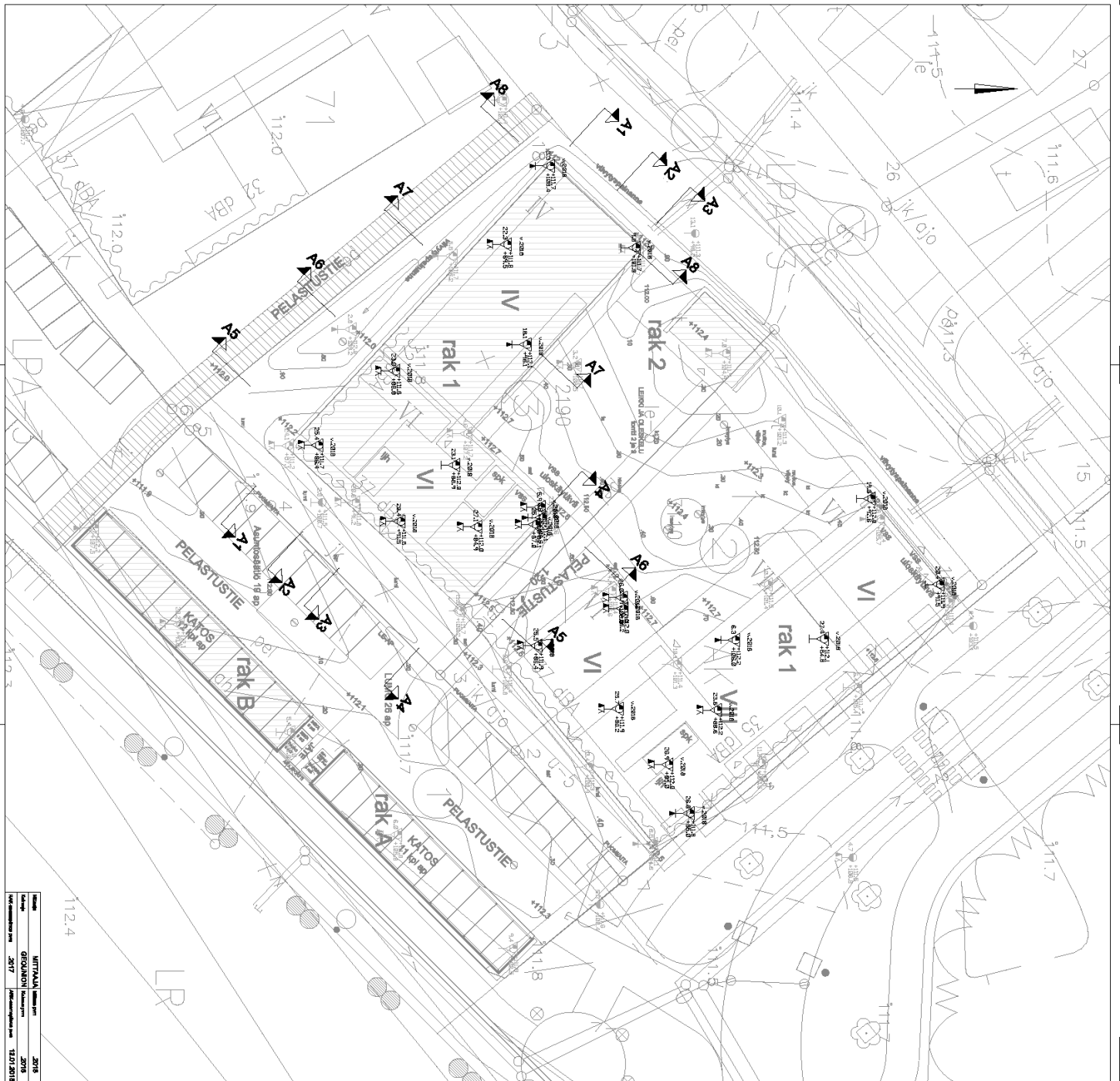


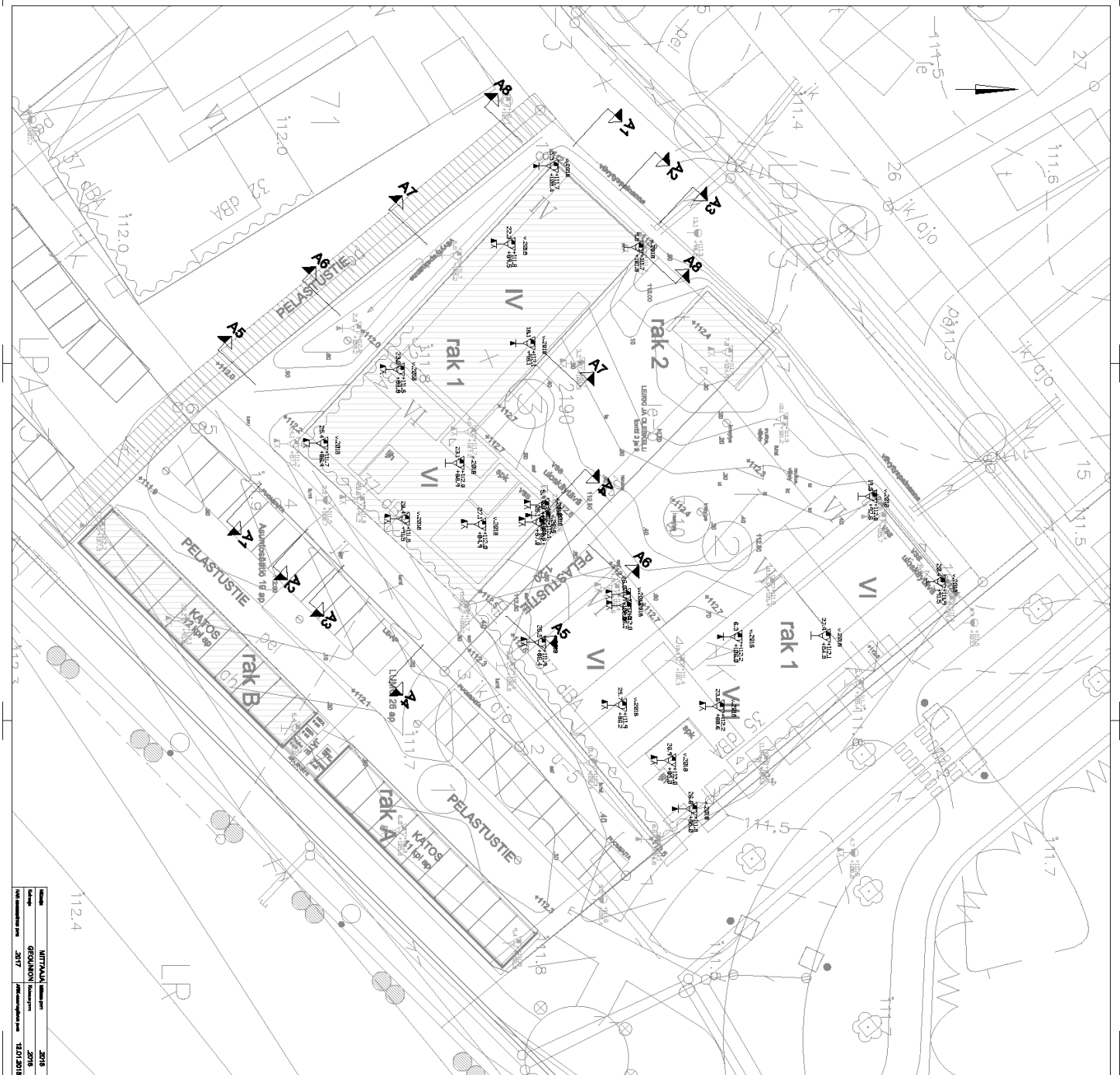
Pile Dynamics, Inc.
K3 Logistics
P1216
Junttan HHK5A
PDA Operator: TRi

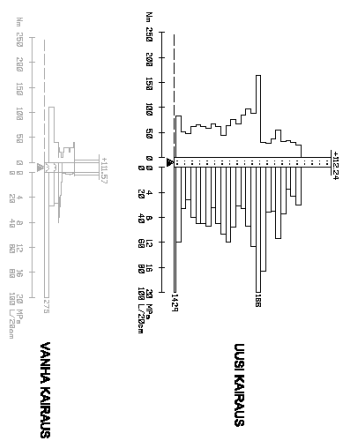
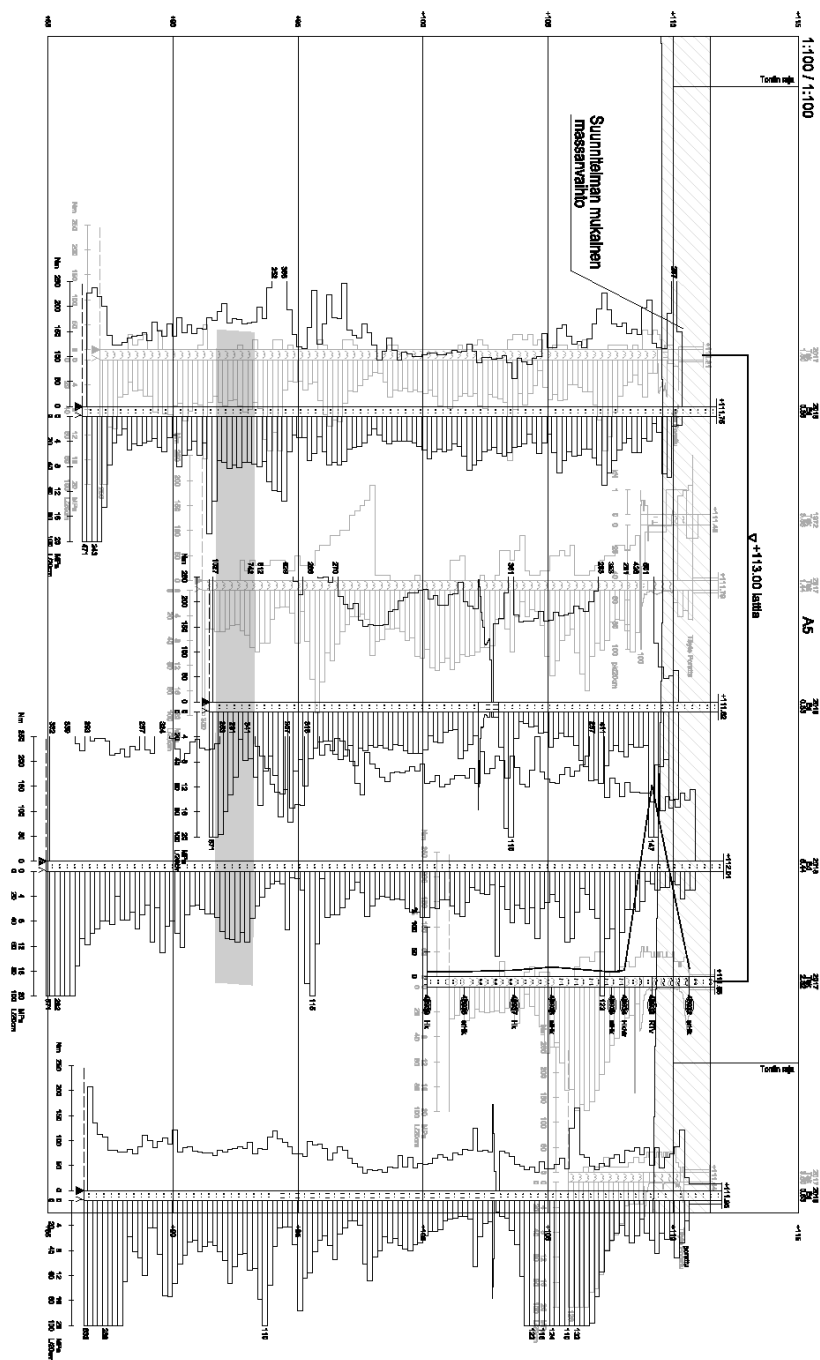
Pile Driving Analyzer® (PDA)
Version: 2016.16



BN 4	
01loka2016 02:37:03	
FMX	2477 kN
RMX	1831 kN
CSX	27,5 MPa
CSI	27,7 MPa
TSX	3,1 MPa
CSB	23,1 MPa
VMX	3,09 m/s
DMX	19 mm
EMX	31,0 kN-m
FVP	0,9 []
LE	15,4 m
AR	900,00 cm^2
EM	39973 MPa
SP	24,5 kN/m3
WS	4000,0 m/s
WC	3898,7 m/s
JC	0,50 []
JF	1,00 []
A1 (PE): [45903]	1165 g/s/volt (1) VF1
A2 (PE): [45906]	1130 g/s/volt (1) VF1
F1: [J246]	91,4 PDICAL (1) FF1
F2: [J252]	92,3 PDICAL (1) FF1

[illegible]



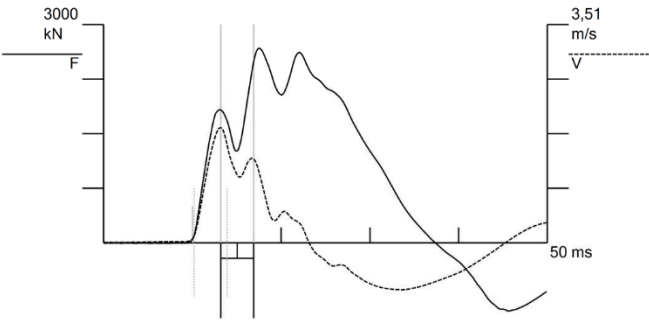


VAIN URAKKALASKENTAA VARTEN 26.03.2018

[illegible]

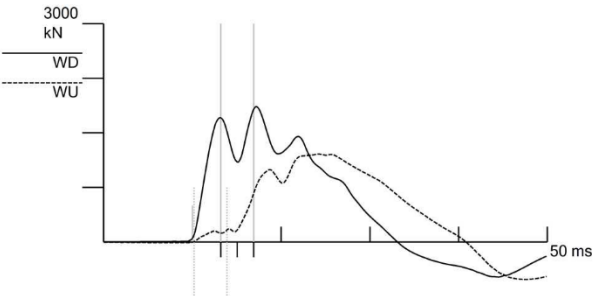
Pile Dynamics, Inc.
180418TRi Hyvinkää
11
Junttan HHK 5A
PDA Operator: TRi

Pile Driving Analyzer® (PDA)
Version: 2017.22



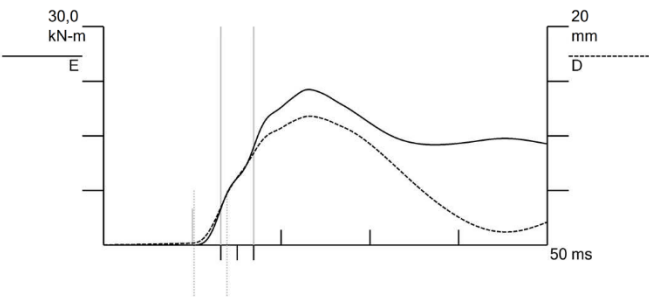
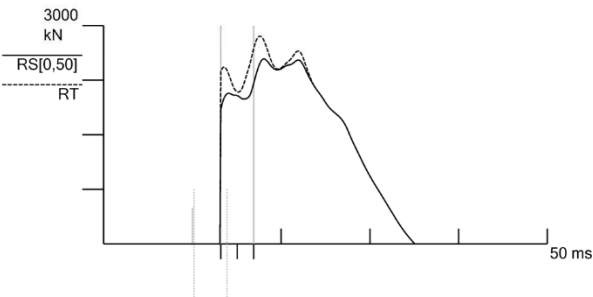
BN 2
18huhti2018 06:22:44

FMX 2674 kN
RMX 2543 kN
CSX 29,7 MPa
CSI 33,7 MPa
CSB 29,9 MPa
TSX 11,1 MPa
VMX 1,85 m/s
DMX 12 mm
EMX 21,4 kN-m
FVP 1,17
LP 5,0 m



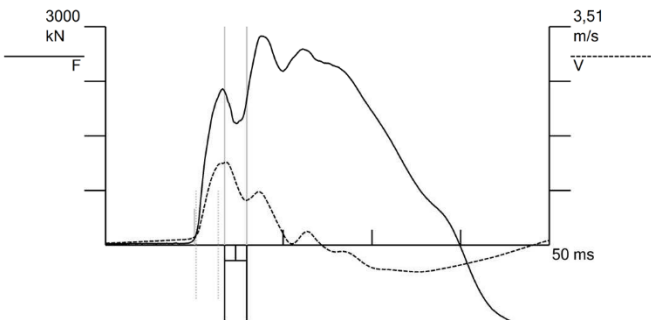
LE 6,4 m
AR 900,00 cm^2
EM 36076 MPa
SP 24,5 kN/m3
WS 3800,0 m/s
WC 3468,0 m/s
JC 0,50
JF 1,00

F1: [M142] 148,5 PDICAL (1) FF5
F2: [O750] 147,2 PDICAL (1) FF5
A3 (PE): [567590] 945 g/s/volt (1) VF5
A4 (PE): [56591] 975 g/s/volt (1) VF5



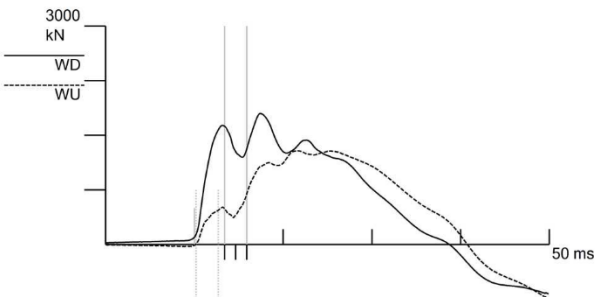
Pile Dynamics, Inc.
180418TRi Hyvinkää
42
Junttan HHK 5A
PDA Operator: TRi

Pile Driving Analyzer® (PDA)
Version: 2017.22



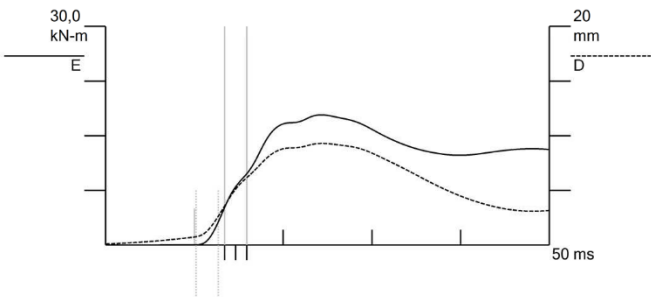
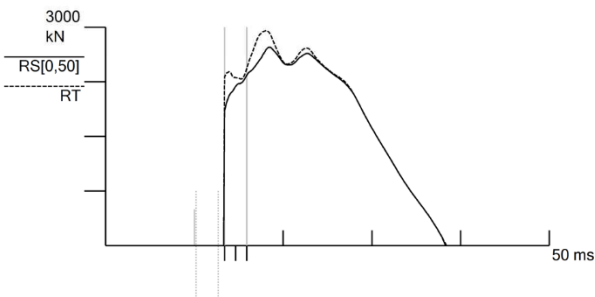
BN 6
18huhti2018 06:14:13

FMX	2871 kN
RMX	2724 kN
CSX	31,9 MPa
CSI	43,3 MPa
CSB	32,8 MPa
TSX	16,9 MPa
VMX	1,33 m/s
DMX	9 mm
EMX	17,9 kN-m
FVP	1,99
LP	3,3 m



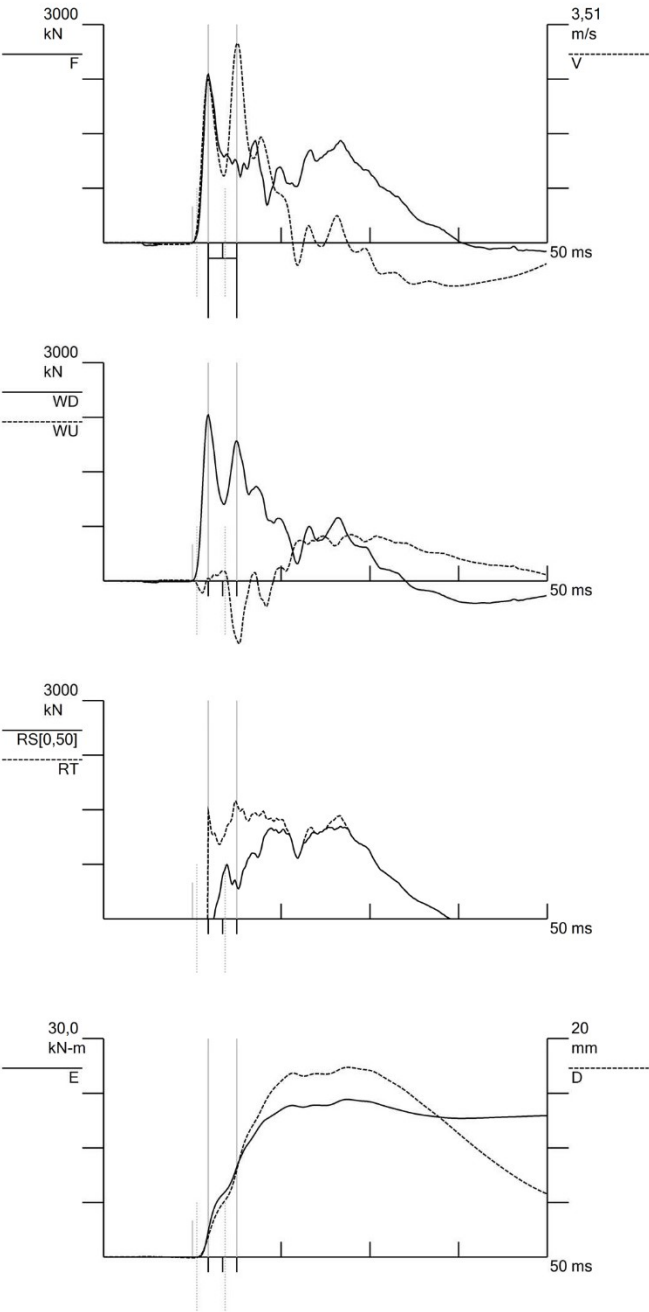
LE	4,6 m
AR	900,00 cm^2
EM	36076 MPa
SP	24,5 kN/m3
WS	3800,0 m/s
WC	3680,0 m/s
JC	0,50
JF	1,00

F1: [M142]	148,5 PDICAL (1) FF1
F2: [O750]	147,2 PDICAL (1) FF1
A3 (PE): [567590]	945 g/s/volt (1) VF1
A4 (PE): [56591]	975 g/s/volt (1) VF1



Pile Dynamics, Inc.
180419TRi Hyvinkää
222
Junttan HHK 5A
PDA Operator: TRi

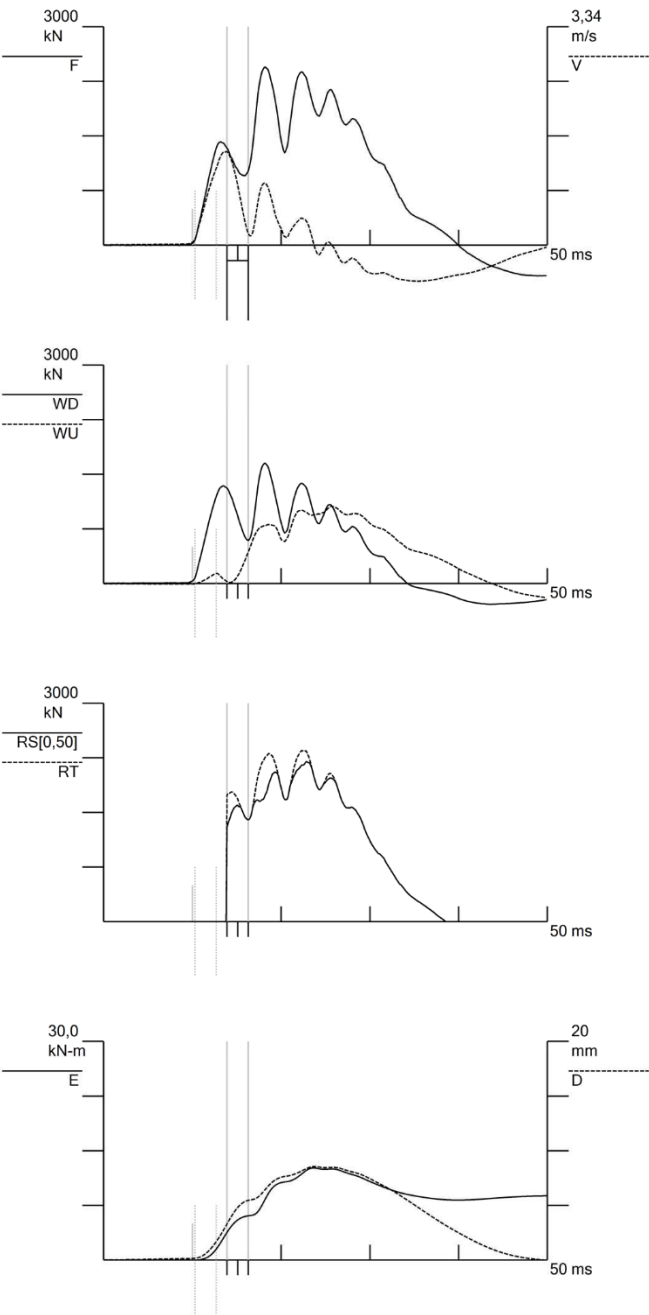
Pile Driving Analyzer® (PDA)
Version: 2017.22



BN 3	19huhti2018 02:49:46
FMX	2315 kN
RMX	1271 kN
CSX	25,7 MPa
CSI	29,6 MPa
CSB	16,1 MPa
TSX	2,6 MPa
VMX	3,21 m/s
DMX	17 mm
EMX	21,6 kN-m
FVP	1,03
LP	5,0 m
LE	6,6 m
AR	900,00 cm^2
EM	36076 MPa
SP	24,5 kN/m3
WS	3800,0 m/s
WC	4125,0 m/s
JC	0,50
JF	1,00
F1: [M142]	148,5 PDICAL (1) FF3
F2: [O750]	147,2 PDICAL (1) FF3
A3 (PE): [567590]	945 g/s/volt (1) VF3
A4 (PE): [56591]	975 g/s/volt (1) VF3

Pile Dynamics, Inc.
180419TRi Hyvinkää
252
Junttan HHK 5A
PDA Operator: TRi

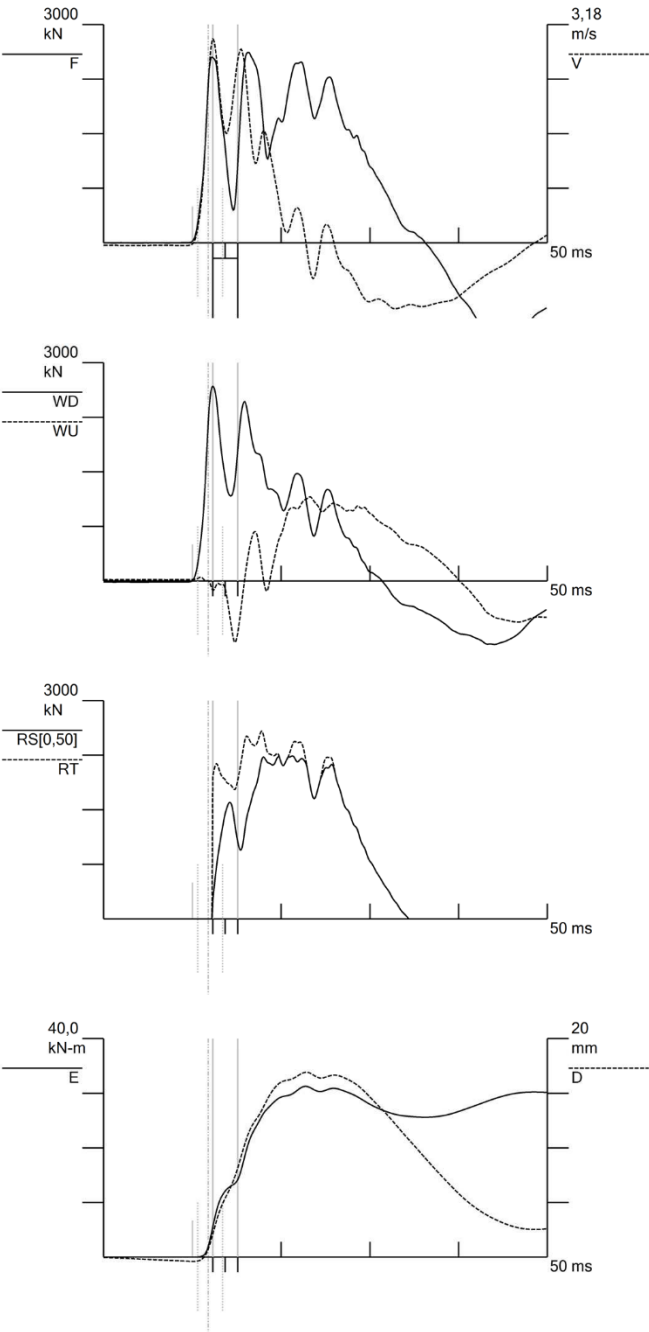
Pile Driving Analyzer® (PDA)
Version: 2017.22



BN 2	
19huhti2018 02:34:16	
FMX	2446 kN
RMX	2196 kN
CSX	27,2 MPa
CSI	29,0 MPa
CSB	26,1 MPa
TSX	5,2 MPa
VMX	1,43 m/s
DMX	9 mm
EMX	12,6 kN-m
FVP	1,05
LP	3,4 m
LE	4,6 m
AR	900,00 cm^2
EM	39973 MPa
SP	24,5 kN/m3
WS	4000,0 m/s
WC	3833,3 m/s
JC	0,50
JF	1,00
F1: [M142]	148,5 PDICAL (1) FF1
F2: [O750]	147,2 PDICAL (1) FF1
A3 (PE): [567590]	945 g/s/volt (1) VF1
A4 (PE): [56591]	975 g/s/volt (1) VF1

Pile Dynamics, Inc.
180419TRi Hyvinkää
270
Junttan HHK 5A
PDA Operator: TRi

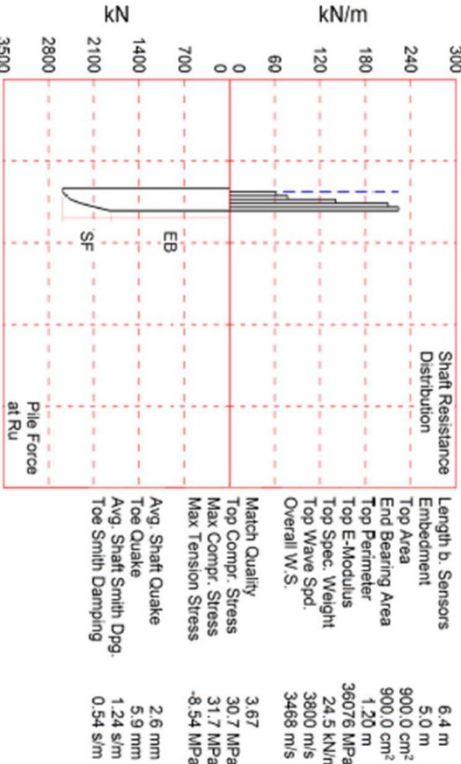
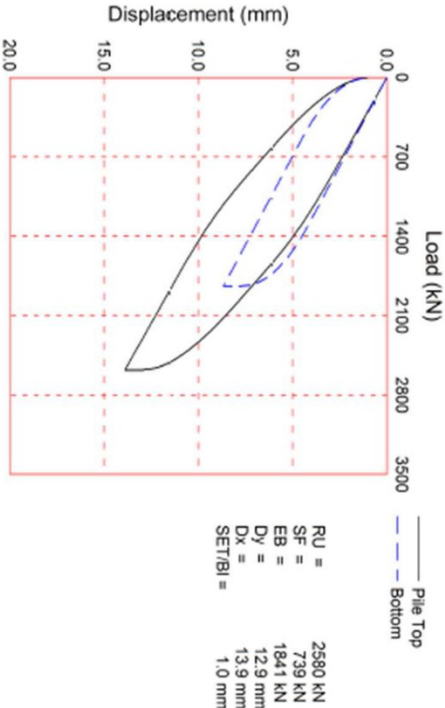
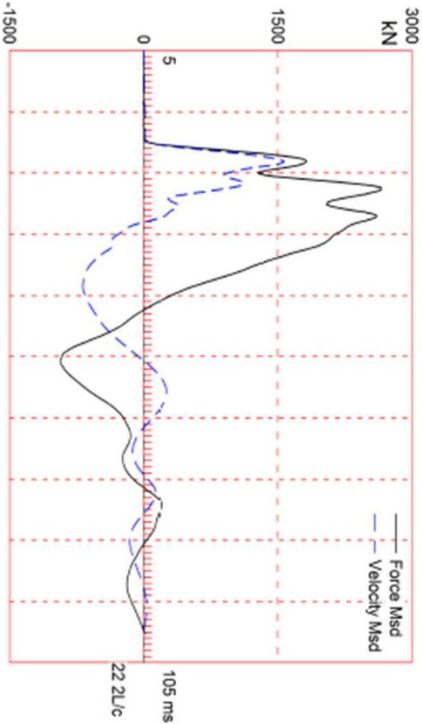
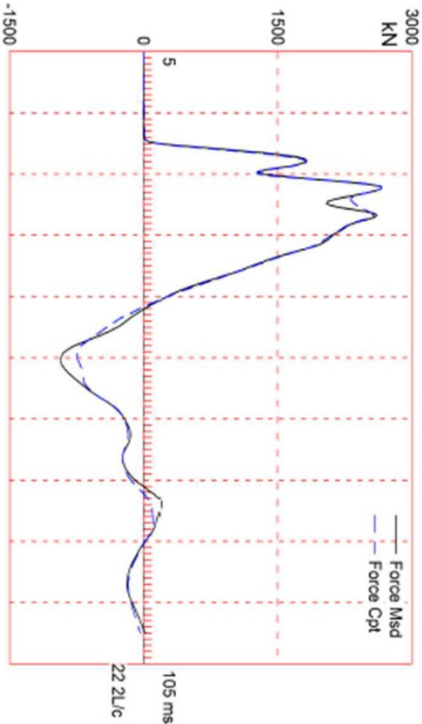
Pile Driving Analyzer® (PDA)
Version: 2017.22



BN 6	19huhti2018 02:28:27
FMX	2617 kN
RMX	2240 kN
CSX	29,1 MPa
CSI	38,1 MPa
CSB	27,8 MPa
TSX	16,0 MPa
VMX	2,97 m/s
DMX	17 mm
EMX	32,5 kN-m
FVP	0,89
LP	3,8 m
LE	5,0 m
AR	900,00 cm^2
EM	44070 MPa
SP	24,5 kN/m3
WS	4200,0 m/s
WC	3618,4 m/s
JC	0,50
JF	1,00
F1: [M142]	148,5 PDICAL (1) FF6
F2: [O750]	147,2 PDICAL (1) FF6
A3 (PE): [567590]	945 g/s/volt (1) VF6
A4 (PE): [56591]	975 g/s/volt (1) VF6

180418TRI Hyvinkää, Pile: 11; Junttan HHK 5A; Blow: 2 (Test: 18-Apr-2018 06:22:)

19-Apr-2018
CAPWAP(R) 2014-3



CAPWAP(R) 2014-3 Licensed to Inspecta Oy

CAPWAP SUMMARY RESULTS							
Total CAPWAP Capacity:		2579.9; along Shaft		739.3; at Toe		1840.6 kN	
Soil Sgmnt No.	Dist. Below Gages m	Depth Below Grade m	Ru kN	Force in Pile kN	Sum of Ru kN	Unit Resist. (Depth) kN/m	Unit Resist. (Area) kPa
				2579.9			
1	2.1	0.7	45.2	2534.7	45.2	61.64	51.36
2	3.2	1.8	82.0	2452.7	127.2	76.87	64.06
3	4.3	2.9	149.9	2302.8	277.1	140.53	117.11
4	5.3	3.9	223.8	2079.0	500.9	209.81	174.84
5	6.4	5.0	238.4	1840.6	739.3	223.50	186.25
Avg. Shaft			147.9			147.86	123.22
Toe			1840.6				20451.11
Soil Model Parameters/Extensions					Shaft	Toe	
Smith Damping Factor					1.24	0.54	
Quake (mm)					2.6	5.9	
Case Damping Factor					1.07	1.17	
Damping Type					Smith	Sm+Visc	
Unloading Quake (% of loading quake)					72	90	
Reloading Level (% of Ru)					100	100	
Resistance Gap (included in Toe Quake) (mm)						0.0	
Soil Plug Weight (kN)					1.779	1.471	
Soil Support Dashpot					1.835	0.000	
Soil Support Weight (kN)					6.40	0.00	
CAPWAP match quality		=	3.67	(Wave Up Match) ; RSA = 0			
Observed: Final Set		=	1.0 mm;	Blow Count	=	1000 b/m	
Computed: Final Set		=	1.0 mm;	Blow Count	=	1009 b/m	
max. Top Comp. Stress		=	30.7 MPa	(T= 27.7 ms, max= 1.034 x Top)			
max. Comp. Stress		=	31.7 MPa	(Z= 3.2 m, T= 28.3 ms)			
max. Tens. Stress		=	-8.54 MPa	(Z= 2.1 m, T= 55.4 ms)			
max. Energy (EMX)		=	18.4 kJ;	max. Measured Top Displ. (DMX)= 11.4 mm			

EXTREMA TABLE								
File Sgmnt No.	Dist. Below Gages	max. Force	min. Force	max. Comp. Stress	max. Tens. Stress	max. Trnsfd. Energy	max. Veloc.	max. Displ.
	m	kN	kN	MPa	MPa	kJ	m/s	mm
1	1.1	2763.3	-756.6	30.7	-8.41	18.4	1.79	10.1
2	2.1	2833.2	-768.2	31.5	-8.54	17.3	1.75	9.2
3	3.2	2856.2	-757.5	31.7	-8.42	15.4	1.78	8.3
4	4.3	2794.5	-714.2	31.0	-7.94	13.2	1.73	7.5
5	5.3	2588.9	-580.3	28.8	-6.45	10.7	1.59	6.7
6	6.4	2295.8	-345.7	25.5	-3.84	7.1	1.39	5.9
Absolute	3.2			31.7			(T =	28.3 ms)
	2.1				-8.54		(T =	55.4 ms)

CASE METHOD										
J =	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
RP	2352	2246	2140	2034	1928	1823	1717	1611	1505	1399
RX	2856	2786	2723	2665	2611	2561	2524	2504	2483	2462
RU	2352	2246	2140	2034	1928	1823	1717	1611	1505	1399
RAU =	2412 (kN);	RA2 =	2241 (kN)							

Current CAPWAP Ru = 2580 (kN); Corresponding J(RP)= 0.00; J(RX) = 0.46

VMX	TVP	VT1*Z	FT1	FMX	DMX	DFN	SET	EMX	QUS	KEB
m/s	ms	kN	kN	kN	mm	mm	mm	kJ	kN	kN/mm
1.85	23.07	1582	1829	2674	11.4	0.8	1.0	20.6	3304	314

PILE PROFILE AND PILE MODEL										
Depth		Area		E-Modulus		Spec. Weight		Perim.		
m		cm ²		MPa		kN/m ³		m		
0.0		900.0		36075.5		24.500		1.20		
6.4		900.0		36075.5		24.500		1.20		
Toe Area		900.0		cm ²						
Segmnt	Dist.	Impedance	Imped.	Tension		Compression		Perim.	Wave	Soil
Number	B.G.		Change	Slack	Eff.	Slack	Eff.		Speed	Plug
	m	kN/m/s	%	mm		mm		m	m/s	kN
1	1.1	854.4	0.0	0.00	0.000	-0.00	0.000	1.20	3468.0	0.000
2	2.1	854.4	0.0	0.00	0.000	-0.00	0.000	1.20	3468.0	0.474
3	3.2	854.4	0.0	0.00	0.000	-0.00	0.000	1.20	3468.0	0.326
6	6.4	854.4	0.0	0.00	0.000	-0.00	0.000	1.20	3468.0	0.326

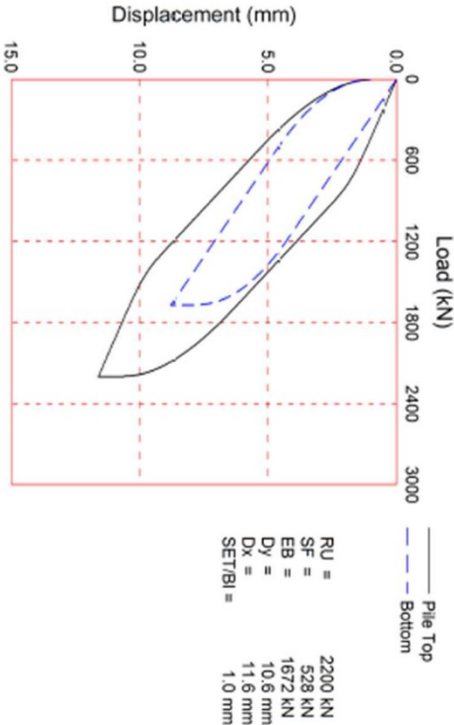
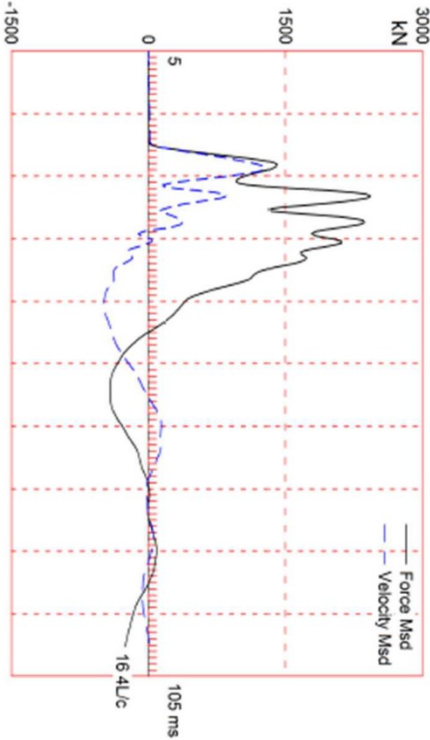
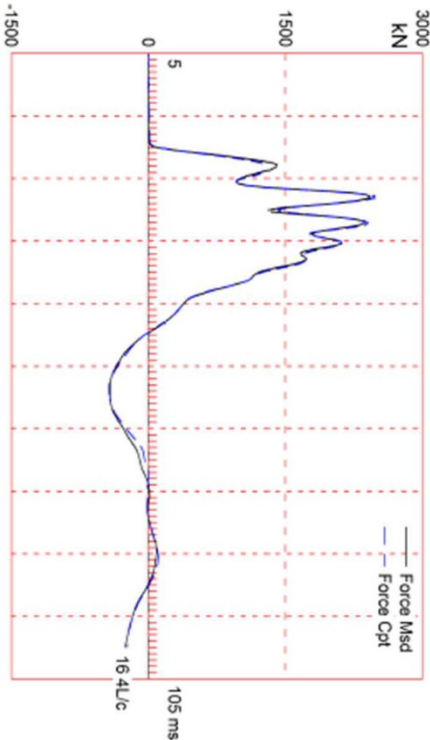
Wave Speed: Pile Top 3800.0, Elastic 3800.0, Overall 3468.0 m/s

File Damping 2.00 %, Time Incr 0.308 ms, 2L/c 3.7 ms

Total volume: 0.576 m³; Volume ratio considering added impedance: 1.000

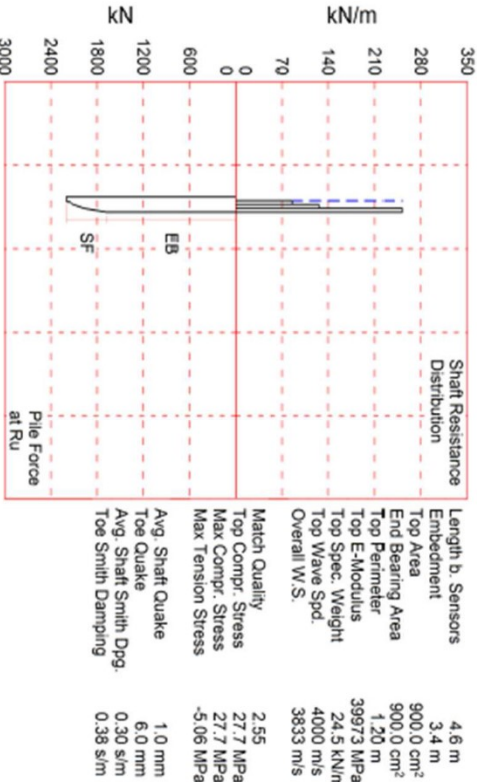
180419TR1 Hyvinkää: Pile: 252, Junttan HHK 5A, Blow: 2 (Test: 19-Apr-2018 02:34:)
Inspecta Oy

19-Apr-2018
CAPWAP(R) 2014-3



— Pile Top
--- Pile Bottom

RU = 2200 kN
SF = 528 kN
EB = 1672 kN
Dy = 10.6 mm
Dx = 11.6 mm
SET/BI = 1.0 mm



Length b. Sensors
Embedment
Top Area
End Bearing Area
Top Perimeter
Top E-Modulus
Top Spec. Weight
Top Wave Spd.
Overall W. S.
Match Quality
Top Compr. Stress
Max Compr. Stress
Max Tension Stress
Avg. Shaft Quake
Toe Quake
Avg. Shaft Smith Dpg.
Toe Smith Damping

4.6 m
3.4 m
900.0 cm²
900.0 cm²
1.20 m
39973 MPa
24.5 kN/m³
4000 m/s
3833 m/s
2.55
27.7 MPa
27.7 MPa
-5.06 MPa
1.0 mm
6.0 mm
0.30 s/m
0.38 s/m

CAPWAP SUMMARY RESULTS							
Total CAPWAP Capacity:		2199.9; along Shaft		528.1; at Toe		1671.8 kN	
Soil Sgmnt No.	Dist. Below Gages	Depth Below Grade	Ru	Force in Pile	Sum of Ru	Unit Resist. (Depth)	Unit Resist. (Area)
	m	m	kN	kN	kN	kN/m	kPa
				2199.9			
1	2.3	1.1	93.6	2106.3	93.6	85.09	70.91
2	3.4	2.3	144.9	1961.4	238.5	126.00	105.00
3	4.6	3.4	289.6	1671.8	528.1	251.83	209.86
Avg. Shaft			176.0			155.32	129.44
Toe			1671.8				18575.56
Soil Model Parameters/Extensions					Shaft	Toe	
Smith Damping Factor					0.30	0.38	
Quake (mm)					1.0	6.0	
Case Damping Factor					0.18	0.71	
Damping Type					Viscous	Smith	
Unloading Quake (% of loading quake)					66	88	
Reloading Level (% of Ru)					100	100	
Unloading Level (% of Ru)					87		
Resistance Gap (included in Toe Quake) (mm)						0.0	
Soil Plug Weight (kN)					0.387	0.226	
CAPWAP match quality		=	2.55	(Wave Up Match) ; RSA = 0			
Observed: Final Set		=	1.0 mm;	Blow Count 1000 b/m			
Computed: Final Set		=	0.6 mm;	Blow Count 1592 b/m			
max. Top Comp. Stress		=	27.7 MPa	(T= 28.5 ms, max= 1.000 x Top)			
max. Comp. Stress		=	27.7 MPa	(Z= 1.1 m, T= 28.5 ms)			
max. Tens. Stress		=	-5.06 MPa	(Z= 2.3 m, T= 57.9 ms)			
max. Energy (EMX)		=	11.8 kJ;	max. Measured Top Displ. (DMX)=		8.6 mm	

EXTREMA TABLE								
File Sgmnt No.	Dist. Below Gages	max. Force	min. Force	max. Comp. Stress	max. Tens. Stress	max. Trnsfd. Energy	max. Veloc.	max. Displ.
	m	kN	kN	MPa	MPa	kJ	m/s	mm
1	1.1	2493.7	-447.6	27.7	-4.97	11.8	1.52	7.9
2	2.3	2417.0	-455.0	26.9	-5.06	11.2	1.42	7.3
3	3.4	2194.3	-378.6	24.4	-4.21	9.7	1.30	6.6
4	4.6	2122.7	-257.5	23.6	-2.86	6.5	1.19	6.0
Absolute	1.1			27.7			(T =	28.5 ms)
	2.3				-5.06		(T =	57.9 ms)

CASE METHOD										
J =	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
RP	1736	1648	1559	1471	1383	1294	1206	1118	1029	941
RX	2349	2314	2283	2252	2221	2191	2164	2147	2134	2122
RU	1736	1648	1559	1471	1383	1294	1206	1118	1029	941
RAU =	1526 (kN);		RA2 =		1684 (kN)					
Current CAPWAP Ru = 2200 (kN); Corresponding J(RP)= 0.00; J(RX) = 0.47										

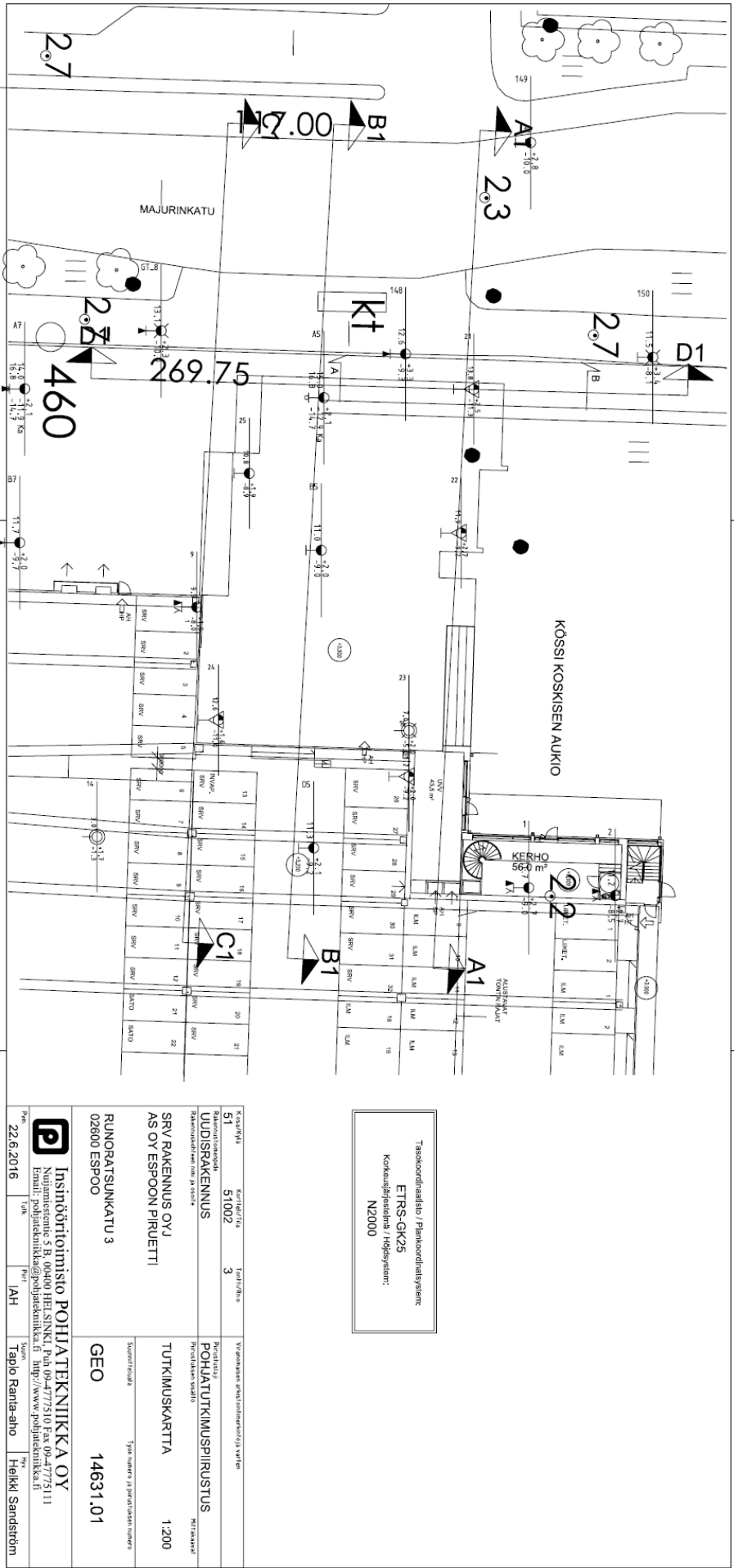
VMX	TVP	VT1*Z	FT1	FMX	DMX	DFN	SET	EMX	QUS	KEB
m/s	ms	kN	kN	kN	mm	mm	mm	kJ	kN	kN/mm
1.43	23.70	1285	1334	2446	8.6	1.0	1.0	12.8	2654	281

PILE PROFILE AND PILE MODEL										
Depth		Area		E-Modulus		Spec. Weight		Perim.		
m		cm ²		MPa		kN/m ³		m		
0.0		900.0		39972.9		24.500		1.20		
4.6		900.0		39972.9		24.500		1.20		
Toe Area		900.0		cm ²						
Segmnt	Dist.	Impedance	Imped.	Tension		Compression		Perim.	Wave	Soil
Number	B.G.		Change	Slack	Eff.	Slack	Eff.		Speed	Plug
	m	kN/m/s	%	mm		mm		m	m/s	kN
1	1.1	899.4	0.0	0.00	0.000	-0.00	0.000	1.20	3833.3	0.000
2	2.3	899.4	0.0	0.00	0.000	-0.00	0.000	1.20	3833.3	0.127
3	3.4	899.4	0.0	0.00	0.000	-0.00	0.000	1.20	3833.3	0.130
4	4.6	899.4	0.0	0.00	0.000	-0.00	0.000	1.20	3833.3	0.130

Wave Speed: Pile Top 4000.0, Elastic 4000.0, Overall 3833.3 m/s

File Damping 2.00 %, Time Incr 0.300 ms, 2L/c 2.4 ms

Total volume: 0.414 m³; Volume ratio considering added impedance: 1.000



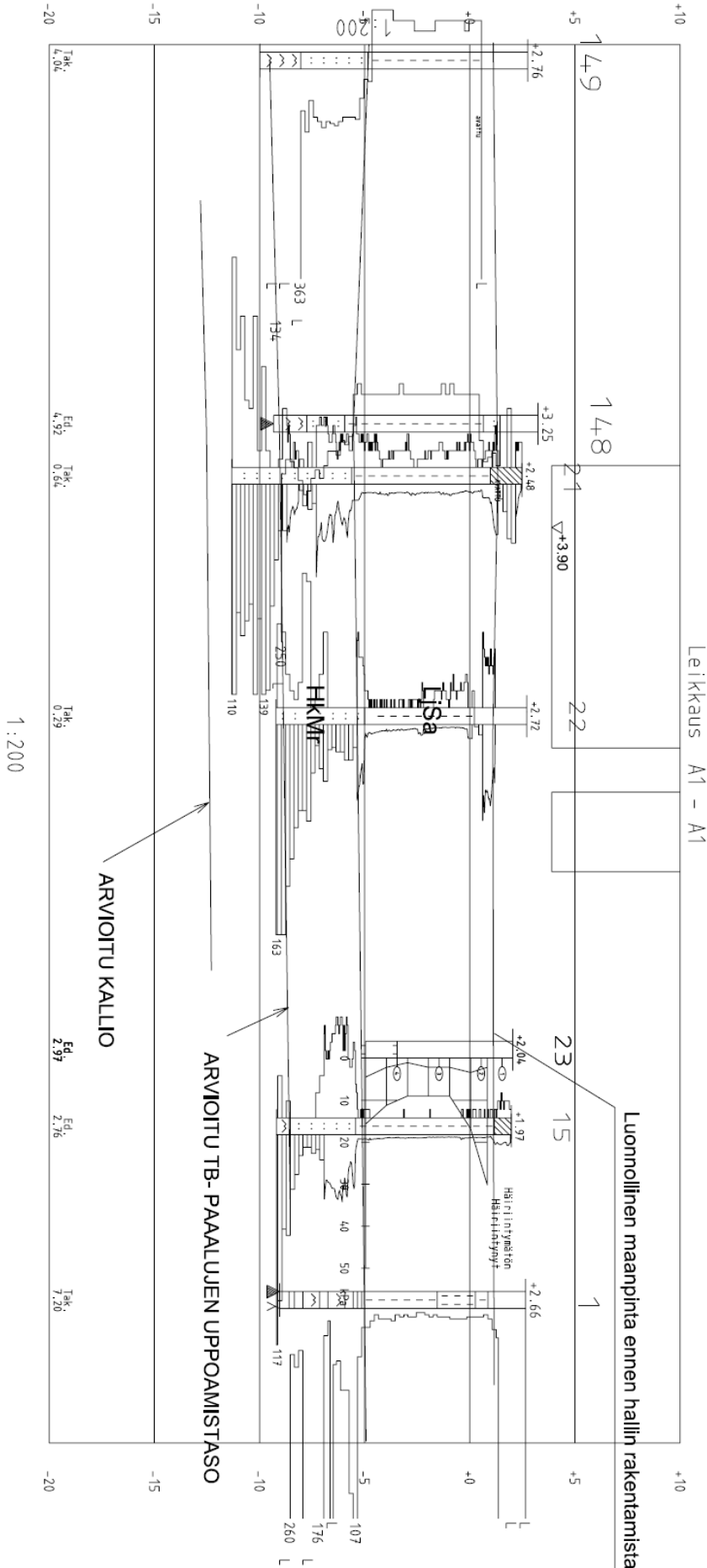
Tasokortinlaatu / Pinnakortinlaatu
ETRS-GK25
Korkeusjärjestelmä / Höjdsystem:
NZ000

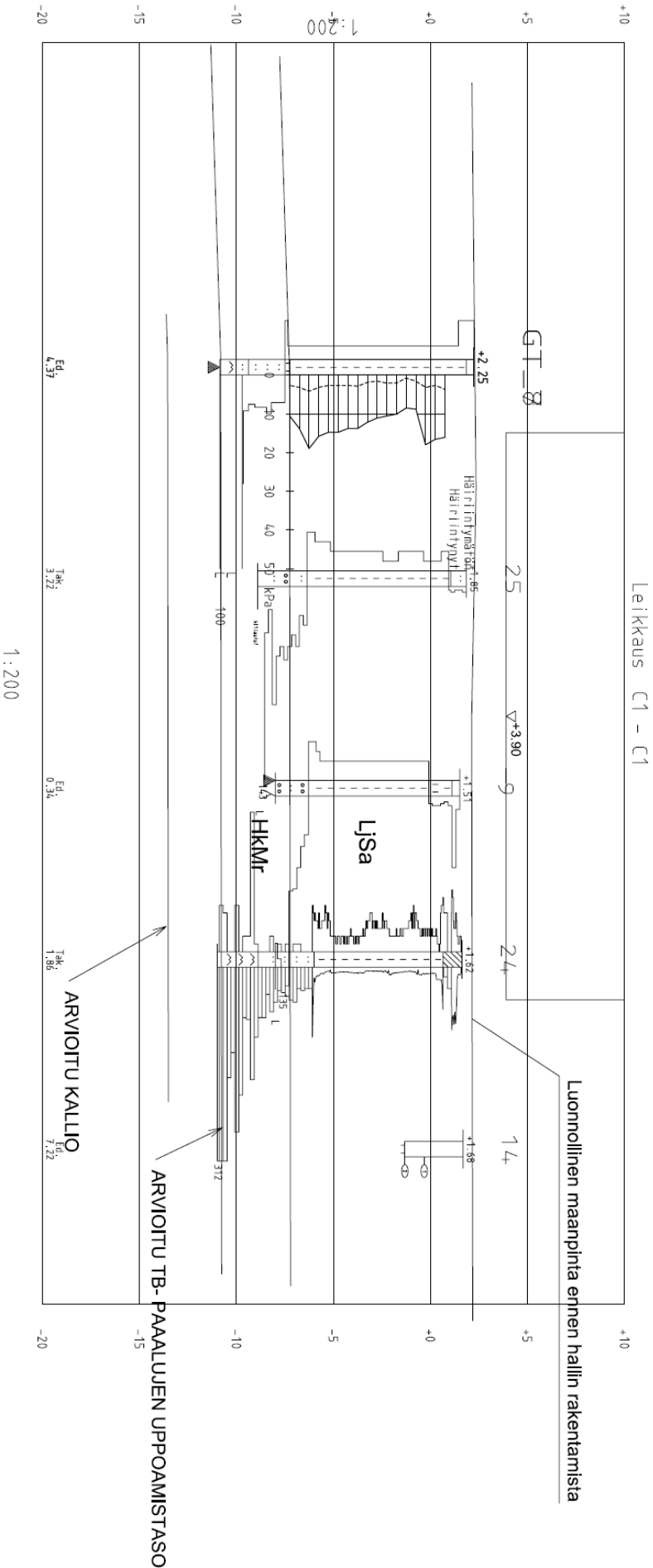
Kaavakohde	Kortinlaatu	Formaattioikeus	Yrityksen nimi ja toimintatila
51	51002	3	Puolustusvoimien Pohjatuotteen tuotanto
Rakennusvaihe	Uudisrakennus		Puolustusvoimien ja siviiliväestön Pohjatuotteen tuotanto
Rakennusvaihe	Uudisrakennus		Puolustusvoimien ja siviiliväestön Pohjatuotteen tuotanto
SRV RAKENNUS OYJ	AS OY ESPOON PIIRUETTI		TUTKIMUSKARTTA
RUNORATSIKATU 3	02800 ESPOO		1.200
GEO	14631.01		Työn numero ja projektin nimi

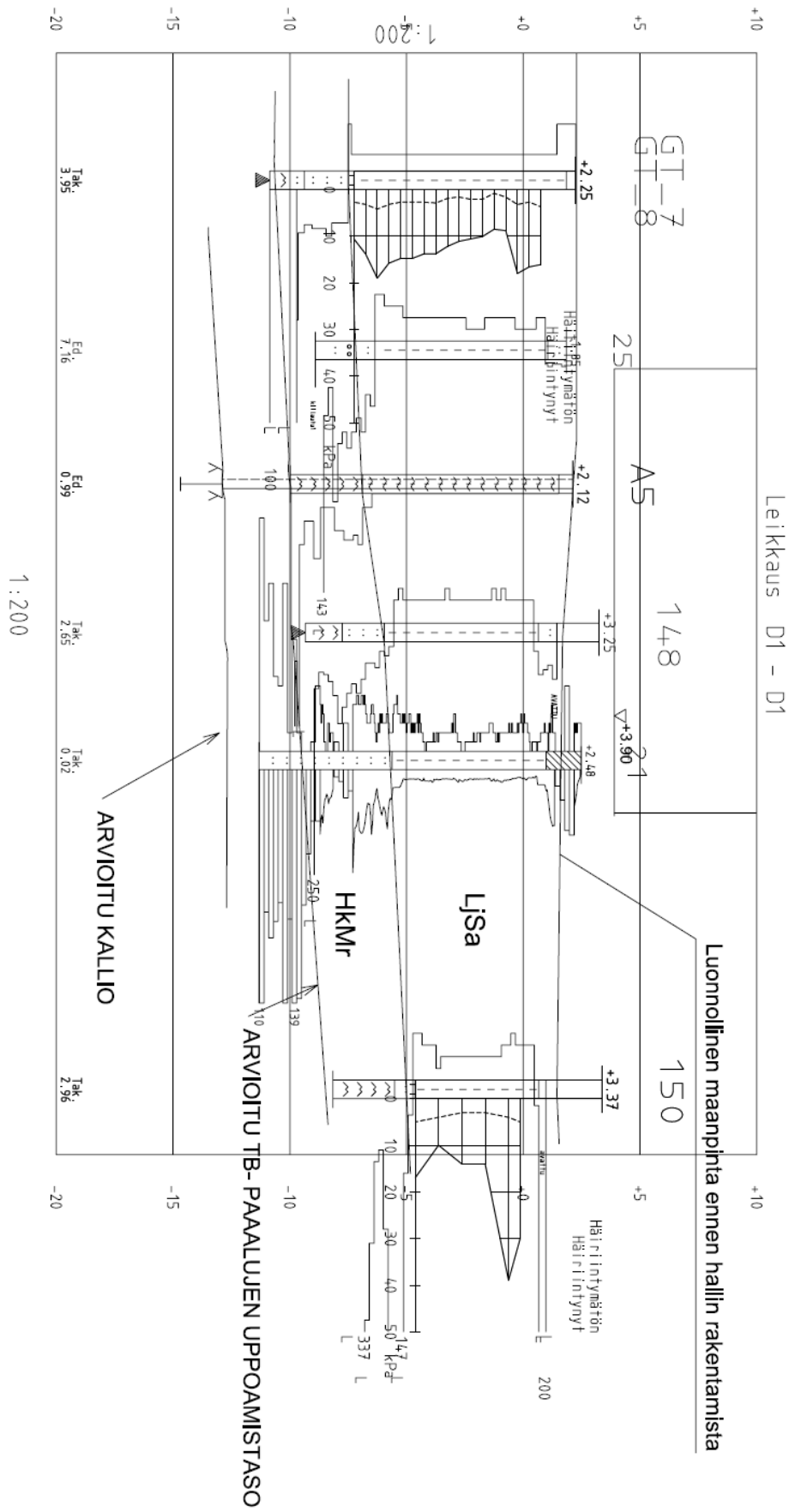
Insinööritoimisto POHJATEKNIikka OY
Nuijamiestentie 5 B, 00400 HELSINKI, Puh 09-477510 Fax 09-4775111
Email: pohjateknika@pohjateknika.fi http://www.pohjateknika.fi

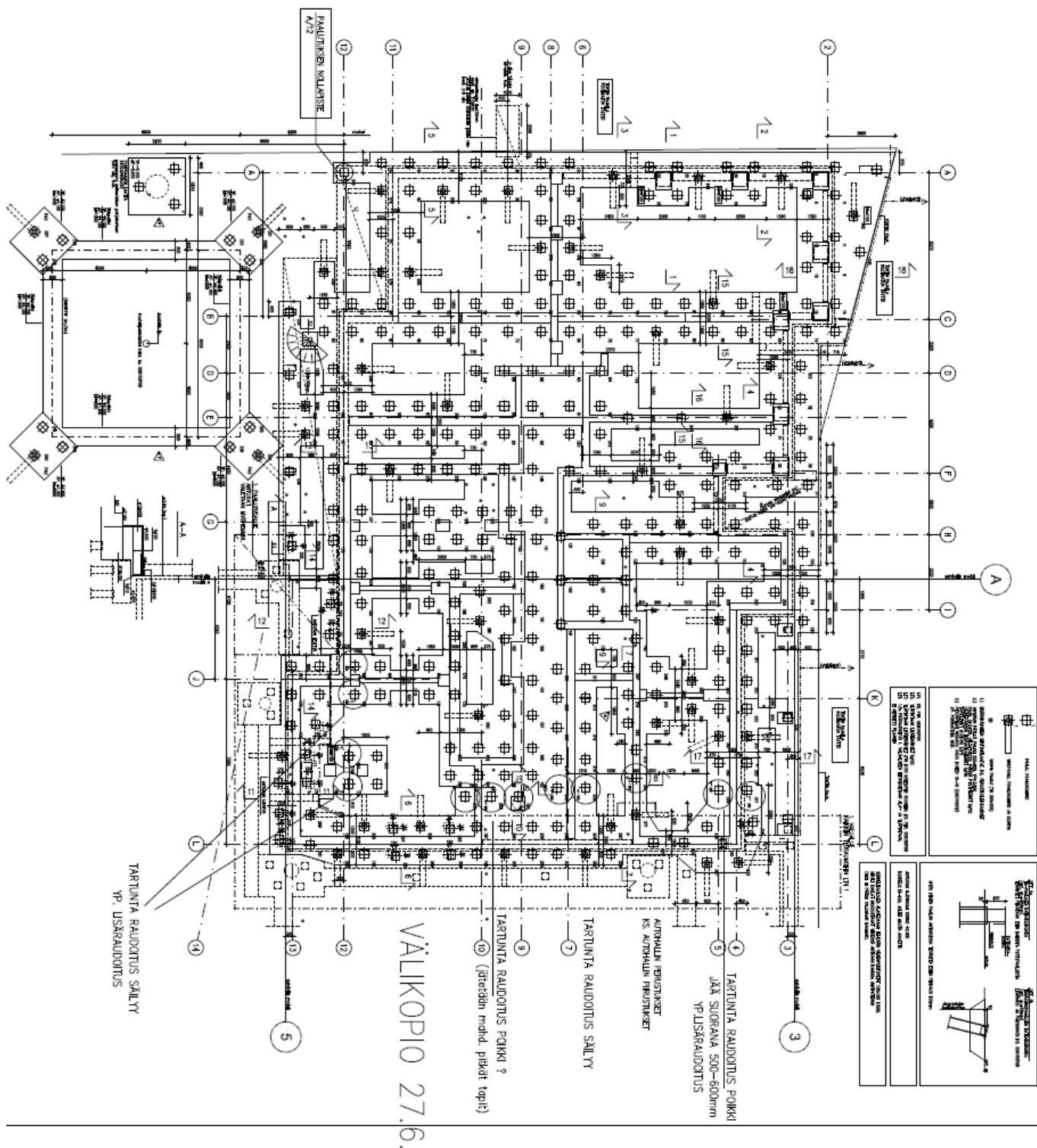
Pvm 22.6.2016 Tilaaja Pääsuunnittelija Suunnittelija

Tapio Ranta-aho Heikki Sandström









VÄLIKOPIO 27.6.

VÄLİKOPLO 27.6

STANDARD CHARGE		STANDARD CHARGE	
DATE	TIME	DATE	TIME
1. NAME	2. SEX	3. NAME	4. SEX
5. AGE	6. SEX	7. NAME	8. SEX
9. AGE	10. SEX	11. NAME	12. SEX
13. AGE	14. SEX	15. NAME	16. SEX
17. AGE	18. SEX	19. NAME	20. SEX
21. AGE	22. SEX	23. NAME	24. SEX
25. AGE	26. SEX	27. NAME	28. SEX
29. AGE	30. SEX	31. NAME	32. SEX
33. AGE	34. SEX	35. NAME	36. SEX
37. AGE	38. SEX	39. NAME	40. SEX
41. AGE	42. SEX	43. NAME	44. SEX
45. AGE	46. SEX	47. NAME	48. SEX
49. AGE	50. SEX	51. NAME	52. SEX
53. AGE	54. SEX	55. NAME	56. SEX
57. AGE	58. SEX	59. NAME	60. SEX
61. AGE	62. SEX	63. NAME	64. SEX
65. AGE	66. SEX	67. NAME	68. SEX
69. AGE	70. SEX	71. NAME	72. SEX
73. AGE	74. SEX	75. NAME	76. SEX
77. AGE	78. SEX	79. NAME	80. SEX
81. AGE	82. SEX	83. NAME	84. SEX
85. AGE	86. SEX	87. NAME	88. SEX
89. AGE	90. SEX	91. NAME	92. SEX
93. AGE	94. SEX	95. NAME	96. SEX
97. AGE	98. SEX	99. NAME	100. SEX

1. IDENTIFICATION - A statement of name, rank, position, and organization of the reporting person, and the name, rank, position, and organization of the person being reported on.

2. CHARACTER OF ACT - A statement of the nature of the act, and the date, time, and place of the act.

3. DETAILS OF ACT - A statement of the details of the act, including the names of the persons involved, the nature of the act, and the date, time, and place of the act.

4. DISPOSITION OF ACT - A statement of the disposition of the act, including the name of the person who disposed of the act, the date, time, and place of the disposition, and the nature of the disposition.

5. REMARKS - A statement of any other information that may be pertinent to the act.

6. SIGNATURE - A statement of the signature of the reporting person.

7. DATE - A statement of the date of the report.

8. TIME - A statement of the time of the report.

9. PLACE - A statement of the place of the report.

10. REPORTING PERSON - A statement of the name, rank, position, and organization of the reporting person.

11. REPORTING PERSON'S SIGNATURE - A statement of the signature of the reporting person.

12. REPORTING PERSON'S DATE - A statement of the date of the report.

13. REPORTING PERSON'S TIME - A statement of the time of the report.

14. REPORTING PERSON'S PLACE - A statement of the place of the report.

15. REPORTING PERSON'S ORGANIZATION - A statement of the organization of the reporting person.

16. REPORTING PERSON'S RANK - A statement of the rank of the reporting person.

17. REPORTING PERSON'S POSITION - A statement of the position of the reporting person.

18. REPORTING PERSON'S NAME - A statement of the name of the reporting person.

19. REPORTING PERSON'S ADDRESS - A statement of the address of the reporting person.

20. REPORTING PERSON'S PHONE NUMBER - A statement of the phone number of the reporting person.

21. REPORTING PERSON'S SOCIAL SECURITY NUMBER - A statement of the social security number of the reporting person.

22. REPORTING PERSON'S MARITAL STATUS - A statement of the marital status of the reporting person.

23. REPORTING PERSON'S RELIGION - A statement of the religion of the reporting person.

24. REPORTING PERSON'S RACE - A statement of the race of the reporting person.

25. REPORTING PERSON'S ETHNICITY - A statement of the ethnicity of the reporting person.

26. REPORTING PERSON'S SEX - A statement of the sex of the reporting person.

27. REPORTING PERSON'S AGE - A statement of the age of the reporting person.

28. REPORTING PERSON'S HEIGHT - A statement of the height of the reporting person.

29. REPORTING PERSON'S WEIGHT - A statement of the weight of the reporting person.

30. REPORTING PERSON'S HAIR COLOR - A statement of the hair color of the reporting person.

31. REPORTING PERSON'S EYE COLOR - A statement of the eye color of the reporting person.

32. REPORTING PERSON'S SKIN COLOR - A statement of the skin color of the reporting person.

33. REPORTING PERSON'S BLOOD TYPE - A statement of the blood type of the reporting person.

34. REPORTING PERSON'S FINGERPRINTS - A statement of the fingerprints of the reporting person.

35. REPORTING PERSON'S PHOTOGRAPH - A statement of the photograph of the reporting person.

36. REPORTING PERSON'S SIGNATURE - A statement of the signature of the reporting person.

37. REPORTING PERSON'S DATE - A statement of the date of the report.

38. REPORTING PERSON'S TIME - A statement of the time of the report.

39. REPORTING PERSON'S PLACE - A statement of the place of the report.

40. REPORTING PERSON'S ORGANIZATION - A statement of the organization of the reporting person.

41. REPORTING PERSON'S RANK - A statement of the rank of the reporting person.

42. REPORTING PERSON'S POSITION - A statement of the position of the reporting person.

43. REPORTING PERSON'S NAME - A statement of the name of the reporting person.

44. REPORTING PERSON'S ADDRESS - A statement of the address of the reporting person.

45. REPORTING PERSON'S PHONE NUMBER - A statement of the phone number of the reporting person.

46. REPORTING PERSON'S SOCIAL SECURITY NUMBER - A statement of the social security number of the reporting person.

47. REPORTING PERSON'S MARITAL STATUS - A statement of the marital status of the reporting person.

48. REPORTING PERSON'S RELIGION - A statement of the religion of the reporting person.

49. REPORTING PERSON'S RACE - A statement of the race of the reporting person.

50. REPORTING PERSON'S ETHNICITY - A statement of the ethnicity of the reporting person.

51. REPORTING PERSON'S SEX - A statement of the sex of the reporting person.

52. REPORTING PERSON'S AGE - A statement of the age of the reporting person.

53. REPORTING PERSON'S HEIGHT - A statement of the height of the reporting person.

54. REPORTING PERSON'S WEIGHT - A statement of the weight of the reporting person.

55. REPORTING PERSON'S HAIR COLOR - A statement of the hair color of the reporting person.

56. REPORTING PERSON'S EYE COLOR - A statement of the eye color of the reporting person.

57. REPORTING PERSON'S SKIN COLOR - A statement of the skin color of the reporting person.

58. REPORTING PERSON'S BLOOD TYPE - A statement of the blood type of the reporting person.

59. REPORTING PERSON'S FINGERPRINTS - A statement of the fingerprints of the reporting person.

60. REPORTING PERSON'S PHOTOGRAPH - A statement of the photograph of the reporting person.

61. REPORTING PERSON'S SIGNATURE - A statement of the signature of the reporting person.

62. REPORTING PERSON'S DATE - A statement of the date of the report.

63. REPORTING PERSON'S TIME - A statement of the time of the report.

64. REPORTING PERSON'S PLACE - A statement of the place of the report.

65. REPORTING PERSON'S ORGANIZATION - A statement of the organization of the reporting person.

66. REPORTING PERSON'S RANK - A statement of the rank of the reporting person.

67. REPORTING PERSON'S POSITION - A statement of the position of the reporting person.

68. REPORTING PERSON'S NAME - A statement of the name of the reporting person.

69. REPORTING PERSON'S ADDRESS - A statement of the address of the reporting person.

70. REPORTING PERSON'S PHONE NUMBER - A statement of the phone number of the reporting person.

71. REPORTING PERSON'S SOCIAL SECURITY NUMBER - A statement of the social security number of the reporting person.

72. REPORTING PERSON'S MARITAL STATUS - A statement of the marital status of the reporting person.

73. REPORTING PERSON'S RELIGION - A statement of the religion of the reporting person.

74. REPORTING PERSON'S RACE - A statement of the race of the reporting person.

75. REPORTING PERSON'S ETHNICITY - A statement of the ethnicity of the reporting person.

76. REPORTING PERSON'S SEX - A statement of the sex of the reporting person.

77. REPORTING PERSON'S AGE - A statement of the age of the reporting person.

78. REPORTING PERSON'S HEIGHT - A statement of the height of the reporting person.

79. REPORTING PERSON'S WEIGHT - A statement of the weight of the reporting person.

80. REPORTING PERSON'S HAIR COLOR - A statement of the hair color of the reporting person.

81. REPORTING PERSON'S EYE COLOR - A statement of the eye color of the reporting person.

82. REPORTING PERSON'S SKIN COLOR - A statement of the skin color of the reporting person.

83. REPORTING PERSON'S BLOOD TYPE - A statement of the blood type of the reporting person.

84. REPORTING PERSON'S FINGERPRINTS - A statement of the fingerprints of the reporting person.

85. REPORTING PERSON'S PHOTOGRAPH - A statement of the photograph of the reporting person.

86. REPORTING PERSON'S SIGNATURE - A statement of the signature of the reporting person.

87. REPORTING PERSON'S DATE - A statement of the date of the report.

88. REPORTING PERSON'S TIME - A statement of the time of the report.

89. REPORTING PERSON'S PLACE - A statement of the place of the report.

90. REPORTING PERSON'S ORGANIZATION - A statement of the organization of the reporting person.

91. REPORTING PERSON'S RANK - A statement of the rank of the reporting person.

92. REPORTING PERSON'S POSITION - A statement of the position of the reporting person.

93. REPORTING PERSON'S NAME - A statement of the name of the reporting person.

94. REPORTING PERSON'S ADDRESS - A statement of the address of the reporting person.

95. REPORTING PERSON'S PHONE NUMBER - A statement of the phone number of the reporting person.

96. REPORTING PERSON'S SOCIAL SECURITY NUMBER - A statement of the social security number of the reporting person.

97. REPORTING PERSON'S MARITAL STATUS - A statement of the marital status of the reporting person.

98. REPORTING PERSON'S RELIGION - A statement of the religion of the reporting person.

99. REPORTING PERSON'S RACE - A statement of the race of the reporting person.

100. REPORTING PERSON'S ETHNICITY - A statement of the ethnicity of the reporting person.

101. REPORTING PERSON'S SEX - A statement of the sex of the reporting person.

102. REPORTING PERSON'S AGE - A statement of the age of the reporting person.

103. REPORTING PERSON'S HEIGHT - A statement of the height of the reporting person.

104. REPORTING PERSON'S WEIGHT - A statement of the weight of the reporting person.

105. REPORTING PERSON'S HAIR COLOR - A statement of the hair color of the reporting person.

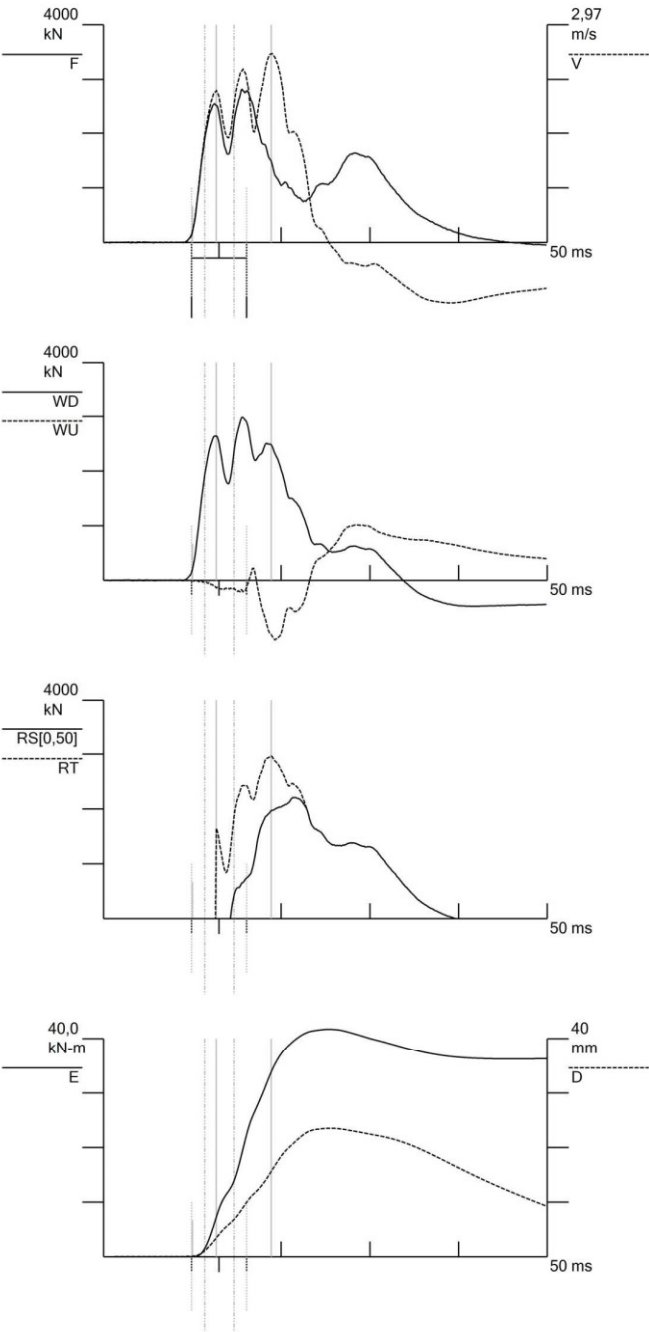
106. REPORTING PERSON'S EYE COLOR - A statement of the eye color of the reporting person.

107. REPORTING PERSON'S SKIN COLOR - A statement of the skin color of the reporting person.

108. REPORTING PERSON'S BLOOD TYPE - A statement of the blood type of the reporting person.

Pile Dynamics, Inc.
170622TRi Espoon Piruetti
P15
Junttan HHK 5A
PDA Operator: TRi

Pile Driving Analyzer® (PDA)
Version: 2016.16

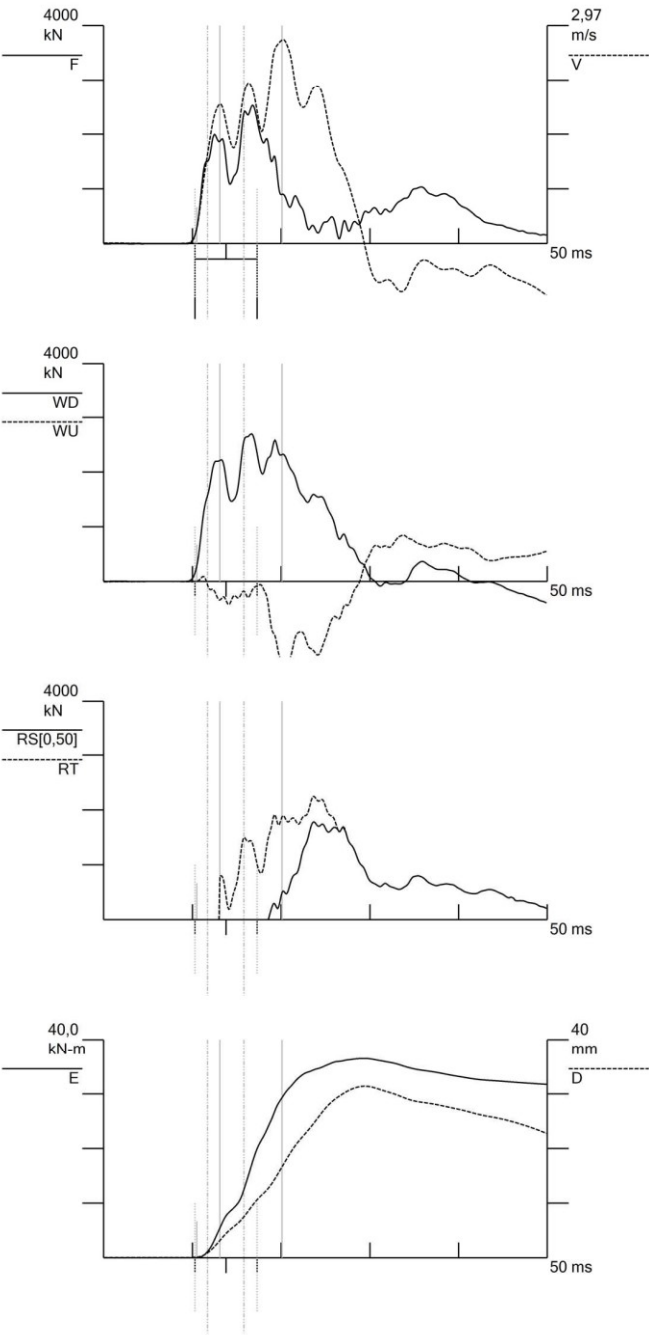


BN 6
22kesä2017 11:12:15

FMX	2801 kN
RMX	2209 kN
CSX	22,9 MPa
CSI	28,8 MPa
TSX	1,8 MPa
CSB	24,2 MPa
VMX	2,58 m/s
DMX	24 mm
EMX	41,7 kN-m
FVP	0,90 []
LE	12,4 m
AR	1225,00 cm ²
EM	48367 MPa
SP	24,5 kN/m ³
WS	4400,0 m/s
WC	4014,9 m/s
JC	0,50 []
JF	1,00 []
F1: [M094]	149,5 PDICAL (1) FF1
F2: [M136]	146,9 PDICAL (1) FF1
A3 (PE): [50344]	1170 g's/volt (1) VF1
A4 (PE): [50357]	1175 g's/volt (1) VF1

Pile Dynamics, Inc.
170622TRi Espoon Piruetti
P18-
Junttan HHK 5A
PDA Operator: TRi

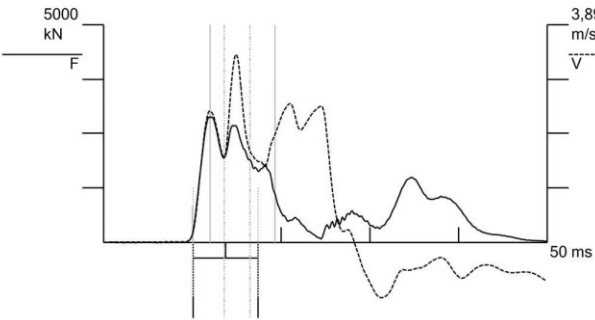
Pile Driving Analyzer® (PDA)
Version: 2016.16



BN 6	
22kesä2017 10:59:35	
FMX	2531 kN
RMX	1783 kN
CSX	20,7 MPa
CSI	24,3 MPa
CSB	17,2 MPa
VMX	2,78 m/s
DMX	31 mm
EMX	36,5 kN-m
FVP	0,74 []
LE	14,2 m
AR	1225,00 cm^2
EM	48367 MPa
SP	24,5 kN/m3
WS	4400,0 m/s
WC	4025,2 m/s
JC	0,50 []
JF	1,00 []
F1: [M094]	149,5 PDICAL (1) FF5
F2: [M136]	146,9 PDICAL (1) FF5
A3 (PE): [50344]	1170 g's/volt (1) VF5
A4 (PE): [50357]	1175 g's/volt (1) VF5

Pile Dynamics, Inc.
170622TRi Espoon Piruetti
P42
Junttan HHK 5A
PDA Operator: TRi

Pile Driving Analyzer® (PDA)
Version: 2016.16

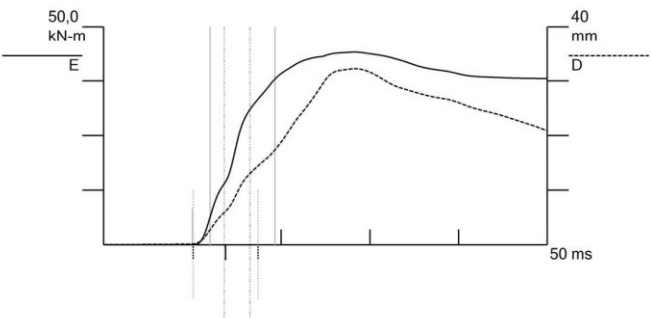
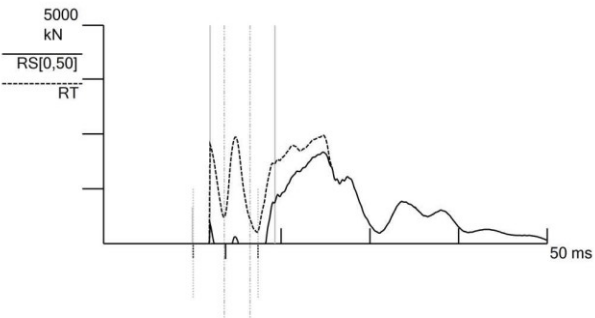
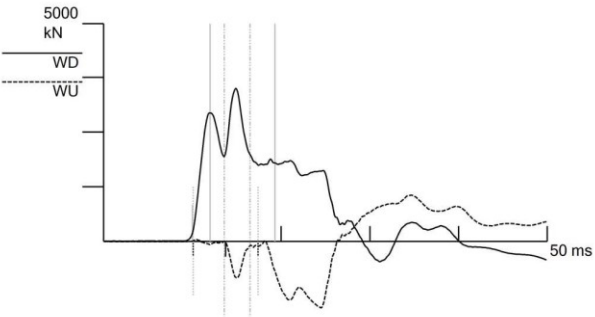


BN 6
22kesä2017 10:15:19

FMX 2872 kN
RMX 2085 kN
CSX 23,4 MPa
CSI 25,7 MPa
CSB 17,1 MPa
VMX 3,36 m/s
DMX 32 mm
EMX 44,1 kN-m
FVP 0,95

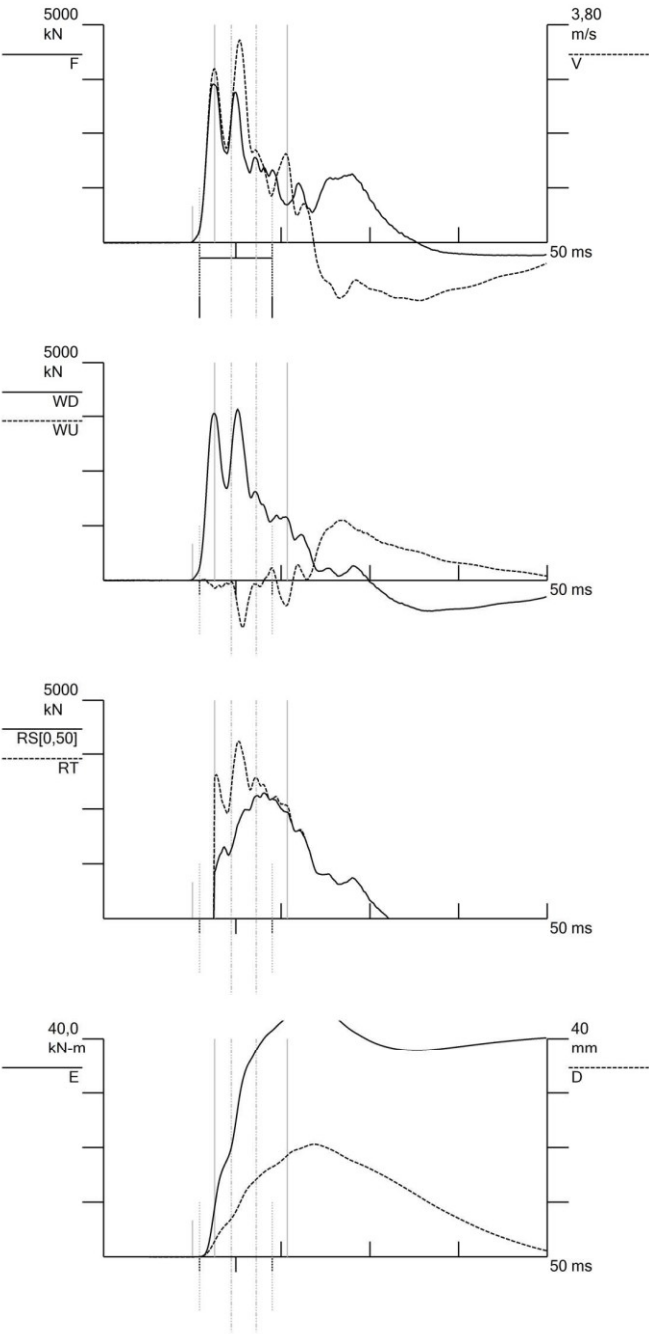
LE 15,3 m
AR 1225,00 cm²
EM 44070 MPa
SP 24,5 kN/m³
WS 4200,0 m/s
WC 4191,8 m/s
JC 0,50
JF 1,00

F1: [M094] 149,5 PDICAL (1) FF1
F2: [M136] 146,9 PDICAL (1) FF1
A3 (PE): [50344] 1170 g's/volt (1) VF1
A4 (PE): [50357] 1175 g's/volt (1) VF1



Pile Dynamics, Inc.
170629TRi Espoo
P42res
Junttan HHK 5A
PDA Operator: TRi

Pile Driving Analyzer® (PDA)
Version: 2017.18



BN 3	
29kesä2017 03:14:55	
FMX	3642 kN
RMX	2865 kN
CSX	29,7 MPa
CSI	30,7 MPa
TSX	4,6 MPa
CSB	27,6 MPa
VMX	3,53 m/s
DMX	21 mm
EMX	45,9 kN-m
FVP	0,91 []
LE	15,3 m
AR	1225,00 cm^2
EM	46194 MPa
SP	24,5 kN/m3
WS	4300,0 m/s
WC	3751,7 m/s
JC	0,50 []
JF	1,00 []
F1: [O745]	152,4 PDICAL (1) FF1
F2: [O752]	149,7 PDICAL (1) FF1
A3 (PE): [567590]	945 g's/volt (1) VF1
A4 (PE): [56591]	975 g's/volt (1) VF1